



Universitat de Lleida



Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Agrària

Departament d'Enginyeria Agroforestal

TREBALL PRÀCTIC TUTORAT



Alumne: Joaquim Company Messa

Tutor: Jaume Arnó Satorra

Cotutor: Ricardo Sanz Cortiella

Titulació: E.T.A en Hortofructicultura i Jardineria

Desembre de 2009

Faber est suae quisque fortunae (Cadascú és el forjador de la seva pròpia fortuna)
(Api Claudi el Cec, s. IV)

La natura és gran en les grans coses, però és grandíssima en les petites
(Abbé de Saint Pierre, s. XVIII)

Estimes la llibertat? El camp és la teva llar
(Andrés Bello, s. XIX)

Dedicado a mis padres Ximo y Maite
y a mis hermanas Teresa y Edith

AGRADECIMIENTOS

Deseo hacer constar mi agradecimiento a algunas personas, para mí significativas, sin cuya valiosa ayuda el presente trabajo quizá no hubiera llegado a buen puerto.

En primer lugar y de un modo especial, deseo expresar mi sincera gratitud hacia mi tutor, el Dr. Jaume Arnó, por su ayuda incondicional. Con él he aprendido mucho. Además, en todo momento ha estado disponible para resolverme vía telefónica, correo electrónico y en el despacho, todo tipo de dudas que me iban surgiendo a medida que realizaba el proyecto.

Agradezco también las atenciones recibidas de mi cotutor, el Dr. Ricardo Sanz, especialmente en lo que concierne al tiempo dedicado a resolverme todo tipo de cuestiones relativas a temas informáticos, o bien a la hora de realizar todas las pasadas con el láser en el campo, que me proporcionaron todos los datos necesarios para la realización de este trabajo

Igualmente hago constar mi agradecimiento al Dr. Joan Ramon Rosell, profesor Àlex Escolà, al Dr. Francesc Solanelles y Dr. Joan Masip por colaborar en todo el tema de las pruebas de campo realizadas en los cultivos e instalaciones de Raïmat.

A Xavi, que realizando al mismo tiempo el proyecto final de ingeniería forestal, ha sido en muchos momentos un gran apoyo durante la realización de este trabajo.

A Roger, por su buen humor y su visión artística en todos los temas de diseño del presente trabajo.

Y por qué no, a muchos amigos, algunos de ellos en la sombra, por los buenos ratos que hemos pasado juntos, haciendo que la realización del presente trabajo fuera más llevadera.

Y una vez más, a mi familia, por el soporte incondicional y constante a lo largo del tiempo que he estado realizando el presente trabajo.

Y a todos aquellos que, aunque de forma tal vez menos vistosa, seguro que también me han ayudado mucho.

A todos, muchísimas gracias.

Joaquim Company Messa

Este trabajo se ha llevado a cabo en el Departament d'Enginyeria Agroforestal formando parte del proyecto de investigación *OPTIDOSA* (AGL2007-66093-C04-03).

ÍNDICE

ÍNDICE DE TERMINOLOGÍA.....	7
1. UNA INTRODUCCIÓN AL USO DE SENSORES EN VITICULTURA	9
1.1 <i>Determinación de la variabilidad vitivinícola mediante redes inalámbricas de sensores</i>	10
1.2 <i>Sensores para la optimización de los tratamientos fitosanitarios</i>	11
1.3 <i>Sensores para la adquisición de datos en viticultura de precisión</i>	11
2. ANTECEDENTES SOBRE EL USO DEL LIDAR EN AGRICULTURA (VITICULTURA)	17
3. OBJETIVOS DEL ESTUDIO	20
4. MATERIAL Y MÉTODOS	21
4.1 <i>Descripción del sistema LIDARUS</i>	21
4.2 <i>Análisis y manejo de los datos suministrados por el LIDAR</i>	25
4.2.1 <u>Obtención de parámetros relacionados con la geometría del cultivo</u> ...	29
4.2.2 <u>Obtención de parámetros relacionados con la estructura vegetativa del cultivo</u>	31
4.3 <i>Pruebas de campo</i>	41
4.4 <i>Determinación experimental del Índice de Área Foliar (IAF)</i>	42
4.5 <i>Análisis estadístico de los resultados</i>	45
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	46
5.1 <i>Determinación del Índice de Área Foliar (IAF)</i>	46
5.2 <i>Uso del LIDAR para la predicción del Índice de Área Foliar</i>	47
5.3 <i>Predicción del Índice de Área Foliar mediante teledetección remota. Comparación con el sensor LIDAR</i>	63

ÍNDICE DE TERMINOLOGÍA

A: Sección transversal de la vegetación

CAQ: Crop Area Quotient

H: Altura de la vegetación

IAF: Índice de Área Foliar

IC: Intervalo de confianza

IDF: Índice de Densidad Foliar

IR: infrarojo cercano

ISF: Índice de Superficie Foliar Externa

LAI: Leaf Area Index

LIDAR: Light Detection and Ranging

MATLAB: MAtrix LABoratory, The MathWorks Inc., Natick, Massachusetts

NDVI: Normalized Difference Vegetation Index

PCD: Plant Cell Density

PVR: Photosynthetic Vigour Ratio

RMSE: Root Mean Square Error

TAD: Tree Area Density

TAI: Tree Area Index

V_D : Volumen Discretizado de la Vegetación

VP: Viticultura de Precisión

1. UNA INTRODUCCIÓN AL USO DE SENSORES EN VITICULTURA

En los últimos años dentro del sector vitivinícola español, se está llevando a cabo una reconversión y una reconstrucción del sistema. Actualmente, España es el país del mundo con mayor superficie de viña para vinificación. A pesar de ello, los llamados países del nuevo mundo del vino (Australia, Estados Unidos, Sudáfrica, Chile, etc.) también han sufrido cambios en el sector, incrementando su producción, calidad y orientándose netamente al mercado exterior.

Esta situación, está siendo una preocupación para los distribuidores, consumidores, Administraciones Públicas... por intentar llegar a conseguir unos productos de calidad que aporten garantías sobre su seguridad y que se obtengan con procesos respetuosos con el medio ambiente. Ya que estas características van a ser los componentes clave para la demanda de futuro.

Para muchos agricultores, la principal característica de la producción es la cantidad; sin embargo, para los viticultores, la producción entendida como cantidad no es tan beneficiosa como en otros cultivos. Esto es debido fundamentalmente a la diferencia de precio existente entre un producto con un alto grado de calidad y otro sin calidad.

Pues bien, la respuesta a la necesidad de hacer frente a los nuevos condicionantes existentes (seguridad, respeto con el medio ambiente y calidad), ha sido la creación de un nuevo sistema de producción llamado: viticultura de precisión. Definido como un sistema de gestión integral de las explotaciones, que tiene en cuenta la variabilidad de las características y condiciones en una misma unidad de cultivo, a la hora de realizar cualquier tipo de operación: laboreo, siembra, abonado, tratamientos, riego o cosecha selectiva, fundamentalmente.

1.1 Determinación de la variabilidad vitivinícola mediante redes inalámbricas de sensores

Las redes inalámbricas de sensores representan hoy en día una de las tecnologías más novedosas y ponen de manifiesto el interés por los estudios de la variabilidad a nivel de parcela.

En este campo, las iniciativas se enfocan al diseño de sensores y redes inalámbricas que puedan ser instaladas fácilmente en campos de cultivo, a fin de capturar y transmitir la lectura de un gran número de parámetros, tales como, la temperatura, el nivel de humedad, la radiación solar, etc.

Como consecuencia de ello, uno de los mejores ejemplos para aplicar las redes de sensores es en el campo de la producción vitivinícola, ya que es necesario controlar una gran cantidad de parámetros (insolación, humedad y temperatura en los viñedos, humedad del suelo a diferentes niveles de profundidad), todos ellos implicados en la producción de uva de calidad.

Concretamente dentro del ámbito de la investigación española en este campo, Montero *et al.* (2006) han llevado a cabo el proyecto *WISEVINE* realizado por la Universidad de Castilla-La Mancha (UCLM), que pretende realizar la caracterización y seguimiento de la variabilidad agronómica de una parcela de vid mediante la monitorización a través de redes inalámbricas de sensores.

1.2 Sensores para la optimización de los tratamientos fitosanitarios

Las técnicas de pulverización seguras desde el punto de vista medioambiental han sido desarrolladas con la intención de reducir el uso de los productos fitosanitarios. Es decir, realizar aplicaciones únicamente cuando y donde sea necesario con tal de evitar que hayan pérdidas y éstas vayan al medio. En este sentido, la investigación ha intentado desarrollar nuevas tecnologías para ajustar las dosis de producto en función de la vegetación existente.

En el caso de la viña, como en muchos otros cultivos, los cambios de forma y tamaño durante los diferentes estados de crecimiento implican un ajuste continuo de las dosis de aplicación para optimizar la eficiencia en el momento de realizar el tratamiento.

Se han realizado diferentes propuestas de cómo llegar a caracterizar la vegetación existente. Concretamente en el caso del cultivo de viña, Gil *et al.* (2006) proponen el uso de sensores ultrasónicos para aplicar las dosis en función del principio de la proporción variable, basado en la aplicación a tiempo real y según la variabilidad de la anchura del cultivo. Una vez realizado el ensayo experimental, de media se aplicó menos de un 58 % de producto respecto al que se hubiese aplicado con un tratamiento constante (tradicional).

1.3 Sensores para la adquisición de datos en viticultura de precisión

Centrándonos en el campo de la Viticultura de Precisión (VP), hay diferentes líneas de investigación que tratan de evaluar la variabilidad espacial en viña (adquisición de datos) y el proceso de la toma de decisiones en base al análisis de la variabilidad intraparcelsaria (análisis e interpretación de datos).

En un inicio, la práctica de la AP comienza con la adquisición de datos y, concretamente, con la monitorización del rendimiento de los cultivos (Pérez y Agüera, 2005). En el ámbito de la viticultura, los primeros sensores y monitores de vendimia comienzan a utilizarse en 1999 en Australia (Bramley y Proffitt, 1999). Capaces de

proporcionar los valores de la cosecha de uva de forma fiable y georeferenciada. El interés suscitado por este tipo de tecnología iniciada en Australia y, posteriormente, en países como Francia y España, ha motivado la puesta en marcha de diversos trabajos de investigación. Los objetivos más inmediatos han sido la obtención de mapas de cosecha (mediante la formulación de protocolos estandarizados) y el análisis de la variabilidad espacial de la vendimia. Bramley *et al.* (2000), Bramley (2001a), Bramley y Williams (2001), Bramley *et al.* (2003), Bramley y Lamb (2003) y Bramley y Hamilton (2004), son algunas de las referencias más destacadas en Australia. En Europa, cabe destacar los trabajos de Tisseyre *et al.* (2001), Bordes (2004) y Arnó *et al.* (2005a, b).

También la investigación se ha centrado en evaluar la variabilidad intraparcelar debida al suelo. En viña, la variación espacial de la cosecha parece verse influenciada mayormente por las propiedades físicas del suelo y no tanto por sus propiedades químicas (Bramley y Lamb, 2003). Otros factores que pueden afectar la cosecha de la uva son la topografía de la parcela (Bramley y Lamb, 2003), el estado nutritivo de las cepas (Bordes, 2004; Arnó *et al.*, 2005a) y la posible afectación de parámetros adversos o estado sanitario del cultivo (Zhang *et al.*, 2002).

Por lo tanto, la determinación de todos estos factores que influyen sobre la vendimia requieren de la realización de muestreos tanto del suelo como del cultivo. Como consecuencia del problema de la baja eficiencia del método de muestreo manual (económica y temporal); la solución ha pasado por el desarrollo de sensores locales que puedan efectuar lecturas en continuo (on-the-go sensors) sobre las parcelas, proporcionando los valores de ciertas propiedades del suelo y/o de la estructura vegetativa de los cultivos (Sudduth, 1999).

Para la caracterización del suelo, los sensores eléctricos y electromagnéticos son los que han sido mayoritariamente utilizados hasta el momento, aunque también se han investigado sensores de suelo basados en principios ópticos y radiométricos, mecánicos, acústicos, neumáticos y electroquímicos (Adamchuk *et al.*, 2004). Los sensores de inducción electromagnética, que miden la conductividad eléctrica del suelo (CE), han sido utilizados en VP. Los ejemplos más conocidos son los sensores EM-38 (Geonics Limited, Ontario, Canadá) y *Veris 3100* (Veris Technologies Inc., Salina KS, USA). Además, la implementación de un sistema de posicionamiento global (GPS) ha

permitido que la medida de la CE del suelo pueda realizarse sobre un mayor número de puntos, lográndose una resolución espacial considerable. El interés de la medida de la CE es elevado, al tratarse de un parámetro con buena correlación con la textura del suelo, con la capacidad de retención de agua, con el contenido de materia orgánica, con la salinidad y con la profundidad del suelo (Bramley *et al.*, 2000).

En relación a la caracterización del cultivo, la investigación radica en la obtención de mapas de calidad mediante el uso de sensores. Siendo posible la cuantificación de la calidad y su grado de variación real a nivel parcelario. De tal manera que, junto a los mapas de suelos y rendimiento (cosecha) comentados anteriormente, se podría llegar a un mejor conocimiento del proceso productivo y realizar una zonificación más precisa de la calidad, ante una posible vendimia selectiva de la parcela.

En un inicio, para la estimación de la calidad de la uva se empleaban métodos basados en muestreos puntuales que suponían un elevado coste temporal y económico. Dichos métodos pueden generar posibles errores surgidos de la interpolación de los resultados obtenidos en las muestras y la caracterización de la totalidad de la parcela. A raíz de esta situación, diversas líneas de investigación se han centrado en los sensores remotos y en los sensores terrestres continuos (on-the-go proximal sensing) (Plant, 2001).

Hay que tener en cuenta que la medida directa de la calidad de la uva no es tarea fácil. Únicamente Tisseyre *et al.* (2001) han ensayado con cierto éxito la medida del azúcar (refractometría) y la acidez (pH) mediante sensores embarcados en vendimiadoras. Otra alternativa es la propuesta por Bastida *et al.* (2006), empleando la medida de la temperatura de la uva durante la vendimia como característica posiblemente relacionada con la calidad.

A tenor de la dificultad que surge en el momento de medir la calidad de forma directa, se busca relacionar los términos de cantidad y calidad con el vigor. De hecho se ha llegado a concretar la cifra de 1,2 a 1,5 m² de vegetación por cada kilogramo de uva como ratio deseable para la consecución de una maduración regular y de calidad. Tal y como explica Hidalgo (2006), es evidente que la disposición de una superficie foliar

suficiente y bien expuesta influye en la cantidad de fotosíntesis y, por tanto, en la síntesis y acumulación final de los compuestos de calidad de la uva.

A partir de esta teoría se propone corroborar la idea de que la estimación de la superficie foliar y/o de la densidad foliar, pueden ser una alternativa en la determinación indirecta de la cantidad de cosecha y su calidad.

Actualmente, los índices más utilizados para medir el vigor de las cepas son los siguientes:

- La superficie foliar total o Índice de Área Foliar (IAF o LAI, Leaf Area Index). Este índice mide la superficie total de hojas (m²) por hectárea.
- La Superficie Foliar externa (ISF), también expresado en m² por hectárea, es la superficie de las 2 ó 3 primeras capas de hojas en una hectárea de viñedo.
- El Índice de Densidad Foliar (IDF) o índice de porosidad es la relación entre las hojas exteriores (productivas) y el total de hojas del viñedo.

Debido a la posible relación entre el Índice de Área Foliar (IAF) y características como el estado hídrico de la planta, la presencia o ausencia de plagas y enfermedades, el vigor de la planta, la cantidad de cosecha y/o su calidad, el *IAF* es un índice de interés en viticultura.

Para el cálculo del *IAF*, hoy en día se utilizan diversos tipos de sensores que podrían separarse en cuatro grupos. El primero de ellos, lo constituyen los sensores ópticos terrestres que son capaces de escanear el cultivo y obtener información sobre su geometría y/o estructura vegetativa. En frutales (peral y manzano) se ha experimentado con sensores láser (Sanz *et al.*, 2004, 2005a y b; Walklate *et al.*, 1997 y 2002) y en viña, además de con sensores láser (Arnó *et al.*, 2006), con radiómetros montados sobre tractor (Goutouly *et al.*, 2006).

El segundo grupo de instrumentos para medir el *IAF*, son los sensores de ultrasonidos que permiten la medida del volumen de la copa en frutales de pepita y

olivos (Giles *et al.*, 1988; Solanelles *et al.*, 2006) y en cítricos (Zaman y Schuman, 2005).

El tercer grupo de instrumentos está relacionado con los sensores basados en la reflectancia espectral del cultivo, ya sean remotos o terrestres. Los primeros son utilizados dentro del ámbito de la teledetección. Es decir, de la tecnología que ofrece los sensores remotos (imágenes de satélite y fotografías aéreas digitales). A partir de la información obtenida mediante imágenes multispectrales (reflectancias del espectro electromagnético en distintas longitudes de onda, concretamente, en las bandas del azul, A, verde, V, rojo, R e infrarojo cercano, IR) se construyen determinados índices espectrales de vegetación (índices de vigor del cultivo). Como ejemplos más utilizados en VP, destacan el *PCD* (*Plant Cell Density*), citado por Bramley *et al.*, (2003) el Índice de Vigor *PVR* (*Photosynthetic Vigour Ratio*) (Arkun *et al.*, 2000; Bramley y Lamb, 2003) y el *NDVI* (*Normalized Difference Vegetation Index*), sin duda, el índice más utilizado en VP (Arkun *et al.*, 2000). El *PCD* se calcula como el cociente de las reflectancias del infrarojo cercano y del rojo (IR/R), el Índice de Vigor *PVR* como V/R , y el *NDVI* mediante la combinación adecuada de las reflectancias del infrarojo cercano y del rojo ($IR-R/IR+R$). A pesar de esto, hay un aspecto que limita el uso de esta técnica que es la variación de la relación entre el *IAF* y el *NDVI* en las distintas etapas del cultivo. Este aspecto supone una continua calibración específica según la etapa en la que se encuentre el cultivo.

Dentro del grupo de los sensores terrestres que presentan el valor del *NDVI* hay dos dispositivos que cabría mencionar:

- El sensor *Green Seeker* (NTech Industries Inc., Ukiah, CA, USA) que mide la reflectancia en las bandas electromagnéticas del rojo (670 nm) y del infrarojo cercano (780 nm).
- El sensor *Crop Circle* (Holland Scientific Inc., Lincoln, Nebraska, USA), que mide la reflectancia a partir de la banda visible naranja (590 nm) y la del infrarojo cercano (880 nm).

Finalmente el último grupo de sensores para la estimación del *IAF*, es el que se basa en la medida de la radiación solar interceptada por la copa. Para ello, se utilizan instrumentos ópticos específicos (LAI-2000, SunScan Probe - SS1, etc).

Una vez presentadas las diferentes posibilidades para medir el *IAF*, en el presente trabajo nos hemos decidido por la utilización de un sensor óptico terrestre llamado LIDAR, del cual nos iremos ocupando en los siguientes apartados y que puede tener distintas e interesantes aplicaciones en viticultura. Previamente, eso sí, expondremos cuáles son los antecedentes concretos de su uso en el sector agrícola y los principales objetivos que trataremos de alcanzar en el presente trabajo de investigación.

2. ANTECEDENTES SOBRE EL USO DEL LIDAR EN AGRICULTURA (VITICULTURA)

De acuerdo con la literatura especializada consultada, los sensores láser (acrónimo de *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) no son más que una fuente de luz (rayo láser) obtenida al convertir una energía externa en radiación electromagnética. Frente a otros dispositivos o fuentes de luz, los sensores láser emiten en una única longitud de onda, con la misma fase y con una elevada densidad de energía. De este modo (Lee y Ehsani, 2007), el rayo láser puede recorrer grandes distancias en línea recta, manteniendo durante todo el recorrido un rayo de sección estrecha. Esta característica los hace especialmente indicados para la medida de distancias. En cuanto a su denominación, el sensor láser también se conoce como escáner láser, láser radar o LIDAR (*Light Detection and Ranging*).

Centrándonos ahora en el ámbito de la utilización del LIDAR en agricultura, algunas de las principales aplicaciones que se han llevado a cabo son las siguientes:

- El estudio realizado por Walklate *et al.* (1997 y 2002) en el cual se elabora una metodología en la que se utilizan las lecturas del láser para medir diferentes parámetros vegetativos en manzanos.
- La evaluación de parámetros vegetativos en cultivos arbóreos (Tumbo *et al.*, 2002; Wei y Salyani, 2004 y 2005) y cultivos herbáceos (Ehlert *et al.*, 2007).
- La obtención de imágenes de árboles en tres dimensiones (Sanz *et al.*, 2004 y 2005b).
- La estimación de la superficie foliar en frutales y viña (Sanz *et al.*, 2005a; Arnó *et al.*, 2006; Palacín *et al.*, 2007).

Estas aplicaciones, nombradas anteriormente, irían centradas en la obtención de la superficie foliar y de diferentes parámetros vegetativos que permitirían caracterizar la estructura vegetativa de los cultivos.

A continuación, se muestran otras aplicaciones que se centran más en la línea de la optimización de los tratamientos fitosanitarios en distintos tipos de cultivos. Entre otros, algunos ejemplos de esta aplicación serían los siguientes:

- Walklate *et al.* (2003 y 2006) y Walklate y Cross (2005) en manzano intentan ajustar las dosis de fitosanitarios en base a la densidad de vegetación.

- Escolà *et al.* (2007) mejoran las dosis aplicadas en frutales en base a la estimación del volumen de los árboles con LIDAR y la aplicación variable de pesticidas.

La utilización del LIDAR supone una elevada generación de información que puede ser evaluada posteriormente mediante diversas metodologías. Entre ellas citamos las siguientes:

- Tumbo *et al.* (2002) y Wei y Salyani (2004) obtienen buenas correlaciones entre el volumen de las copas en cítricos medido con láser y las medidas manuales.

- Palacín *et al.* (2007) aplican una metodología similar para la estimación de la superficie foliar en frutales. Asumiendo la existencia de una relación entre el volumen medido con el LIDAR y la superficie foliar.

- Llorens (2005) y Llorens *et al.* (2007) obtienen el volumen del árbol a partir de los puntos generados por el LIDAR en las lecturas correspondientes a los dos lados de una hilera.

El denominador común de todas estas metodologías es la relación supuestamente existente entre el volumen de vegetación y la superficie foliar. Sin embargo, Walklate *et al.* (1997 y 2002) obtienen una serie de parámetros vegetativos resultantes de un análisis de los datos proporcionados por el LIDAR mediante un modelo probabilístico.

Finalmente, Arnó (2008) emplea la metodología de análisis propuesta por Walklate *et al.* (1997 y 2002) para la caracterización de la viña. En los ensayos de campo realizados durante el año 2005, obtiene una correlación altamente significativa

entre el parámetro TAI (*Tree Area Index*), citado por Walklate *et al.* (2002), y el Índice de Área Foliar (IAF) real para franjas de vegetación de 4 m de longitud ($R^2 = 0,9921$), franjas de 2 m ($R^2 = 0,9495$) y para franjas de 1 m ($R^2 = 0,9188$).

3. OBJETIVOS DEL ESTUDIO

A partir de los antecedentes o del estado de la cuestión que acabamos de relatar, los objetivos concretos que nos hemos propuesto desarrollar en el presente trabajo son:

1. Evaluar la predictibilidad del Índice de Área Foliar (IAF) en viña mediante los parámetros calculados con el LIDAR, según la metodología propuesta por Walklate *et al.* (2002).
2. Comparar y validar los resultados obtenidos por Arnó (2008), utilizando ahora el LIDAR en una variedad distinta y tramos de vegetación más cortos (0,5 m).
3. Evaluar la relación existente entre la información del LIDAR (sensor terrestre) y la suministrada mediante fotografía aérea digital (sensor remoto).

4. MATERIAL Y MÉTODOS

4.1 Descripción del sistema LIDARUS

En las pruebas de campo realizadas anteriormente al presente proyecto, para el transporte del LIDAR al lugar de la prueba y su manejo se probaron diversas opciones. Poco a poco fueron evolucionando hasta llegar al montaje definitivo de un sistema llamado LIDARUS, nombre formado a partir de LIDAR + Ultrasonidos. Aunque en el presente proyecto los sensores de ultrasonidos no fueron utilizados. Los diferentes elementos que constituyen el sistema LIDARUS son los siguientes (fig.1):



Figura 1. Componentes del sistema LIDARUS

1) Estructura de soporte

La estructura de soporte consiste en un chasis de dimensiones reducidas. A esta estructura, que disponía de un enganche tripuntal, se le han añadido una serie de elementos para poder ajustarla a las funciones necesarias. Los elementos añadidos fueron:

- Ruedas: la estructura está equipada con cuatro ruedas para permitir el desplazamiento cuando ésta no esté enganchada al tractor. En la parte superior de la estructura se ha montado una plataforma de madera para

colocar todos los elementos de control del sistema (ordenador, GPS y convertidores eléctricos).

- Barra abatible: una barra de aluminio de 3,5 metros, formada por dos partes para poder plegarla después de su utilización y colocarla a una altura de 0,5 m del suelo, permitiendo llegar a una altura operativa de 4 m. Esta barra permitía colocar el sensor láser LMS 200 y los sensores de ultrasonidos.
- Caja de baterías: una caja de plástico sujeta en la parte inferior de la estructura, donde se ubicaban las baterías de alimentación del sistema.



Figura 2. El sistema LIDARUS en campo (Raïmat)

2) Fuente de alimentación

La fuente principal de alimentación del sistema eran dos baterías de coche de 12 V. Con todo, el cable estaba preparado para conectar el sistema a la fuente de alimentación que proporcionaba el tractor. Esta conexión con el tractor no se ha utilizado porque es mejor la independencia del sistema, sobretodo por la delicadeza de los equipos utilizados.

3) Sensor láser LMS 200

El sensor LMS 200, (SICK AG, Waldkirch, Germany), es un dispositivo capaz de medir la distancia a determinados objetos. Para ello, utiliza un rayo láser infrarojo que es emitido (pulsado) a una cierta frecuencia. Cuando el rayo láser encuentra un obstáculo, parte del rayo es reflejado hacia el escáner y es detectado por el receptor del propio LIDAR. El principio de funcionamiento se basa en la medida del tiempo que media entre la emisión y la recepción del rayo. Este tiempo es directamente proporcional a la distancia existente entre el escáner y el objeto (Lee y Ehsani, 2007). Durante la emisión, el rayo láser es deflectado de forma secuencial según un intervalo angular predeterminado. Ello se consigue mediante el uso de un espejo giratorio situado en el interior del escáner (fig. 3). De este modo, se obtiene un escaneado 2D o barrido, describiendo el rayo láser un ángulo total de 180°.

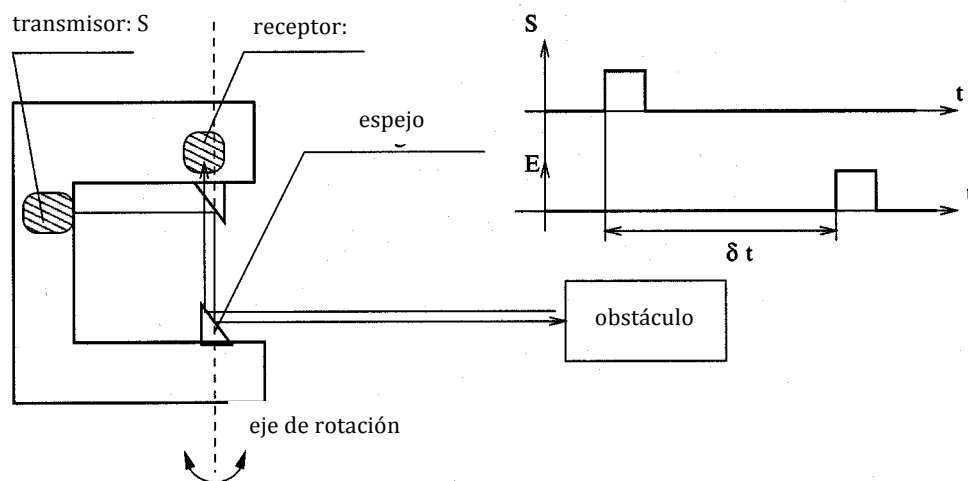


Figura 3. Principio de un láser (adaptado de Chateau *et al.*, 2000)

En este trabajo, el escáner láser LMS 200 emite de forma pulsada un rayo láser infrarojo con una longitud de onda de 905 nm (infrarojo cercano), pudiendo operar en modo milimétrico o en modo centimétrico. En el primer caso (que fue el que finalmente se adoptó en trabajo), la distancia máxima medida era de 8 m (para ser exactos, 8191 mm).

La utilización en campo del escáner LMS 200 se realizó en base a la siguiente configuración:

- modo milimétrico (distancia polar de 8 m)
- ángulo de barrido de 0° a 180°
- resolución angular de 1°

comunicación externa por un puerto serie RS232 a 38,4 kbaud



Figura 4. Escáner LMS 2000

Para el control del escáner, el almacenamiento y transferencia de datos al ordenador portátil y el post-proceso de la información se utilizó el programa MultiScan en el entorno MATLAB (MATrix LABoratory, The MathWorks Inc., Natick, Massachusetts). Este programa había sido desarrollado por el Grupo de Robótica de la Universitat de Lleida. En la tabla 1, se muestran las especificaciones básicas del escáner LMS 200 suministradas por el fabricante.

Tabla 1. Especificaciones del escáner láser LMS 200

Distancia máxima medida (m)	8 (modo mm), 80 (modo cm)
Ángulo de escaneado (°)	180 y 100 (seleccionable)
Resolución angular (°)	0,25, 0,5 y 1 (seleccionable)
Tiempo de escaneado (ms/ciclo)	53, 26 y 13 a 0,25°, 0,5° y 1°, respectivamente
Precisión de medida (mm)	± 15 (modo mm), ± 40 (modo cm)
Transferencia de datos y velocidad	RS232 (9,6 kbit/s, 19,2 kbit/s y 38,4 kbit/s) y RS422 (500 kbit/s)
Fuente de alimentación, VDC	24 ± 15%
Peso (kg)	4,5
Dimensiones (mm)	185 (ancho) x 156 (largo) x 210 (alto)

4) Ordenador portátil Hewlett-Packard modelo nx9000

El ordenador portátil utilizado fue un Hewlett-Packard, que trabajó como unidad central del sensor láser y receptor de los datos obtenidos. Disponía de un puerto serie RS-232 y de dos puertos USB. Este ordenador era el que controlaba y almacenaba los datos del láser LMS 200, y también los datos del sensor GPS. La alimentación de este elemento se realizó a través de su propia batería recargable.

4.2 Análisis y manejo de los datos suministrados por el LIDAR

Para la realización de las pruebas de campo, el LIDAR se situó tal y como muestra la figura 5. Los datos suministrados por el LIDAR (coordenadas polares) y el sistema de referencia del escáner, $R = (O, O_x, O_y, O_z)$, fueron los que aparecen en la figura 5.

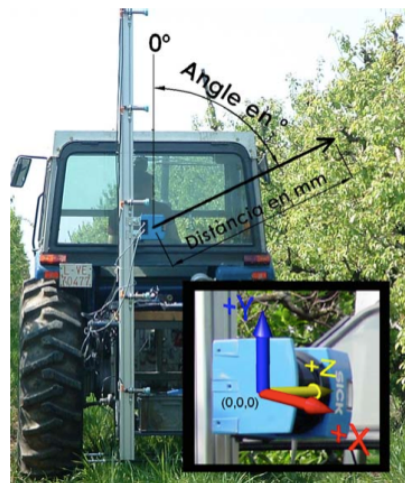


Figura 5. Sistema de coordenadas del LIDAR (adaptado de Llorens, 2005)

En la disposición de los ejes se asumió que:

- O_x : fuera paralelo al suelo y dirigido hacia el interior de la vegetación
- O_y : se mantuviese perpendicular al suelo
- O_z : se situase paralelo al suelo en la dirección de desplazamiento del LIDAR

Con esta disposición, el origen O correspondía al centro del semicírculo de barrido que emitía el escáner (fig. 6).

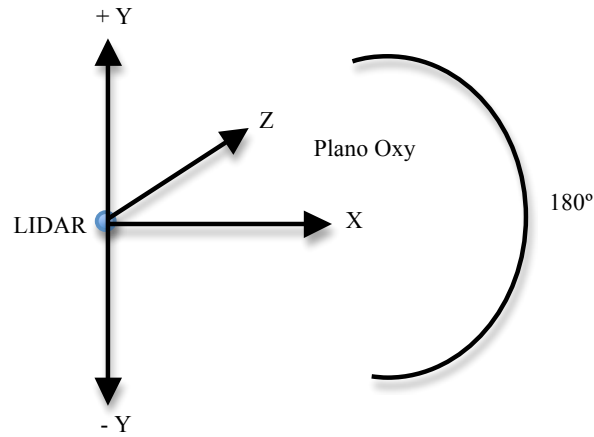


Figura 6. Disposición de los ejes del sistema de referencia del escáner

En cada barrido, la componente Oz del rayo láser era 0. Por tanto, los puntos interceptados de vegetación por el rayo láser en cada semicírculo de los distintos barridos estaban siempre situados en el plano (Oxy).

Tal y como se ha dicho anteriormente, los valores proporcionados por el LIDAR tenían coordenadas polares (r, θ), siendo r la distancia entre el origen de referencia O y la vegetación interceptada, y θ el ángulo entre el eje Oy y la dirección del rayo láser. Las coordenadas cartesianas (x, y, z) se relacionaban con las coordenadas polares (r, θ) mediante la transformación,

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r \cdot \sin(\theta) \\ r \cdot \cos(\theta) \\ 0 \end{pmatrix}$$

El escaneo a lo largo de una hilera de viña se lograba mediante el efecto combinado del barrido vertical (*scan*) del escáner láser y el avance del tractor por la hilera en la dirección de la componente Oz del rayo láser. El número total de datos proporcionados por el LIDAR era directamente proporcional a la cantidad de vegetación (longitud de la hilera) escaneada.

El LIDAR, durante su desplazamiento en relación al cultivo, iba realizando diversos barridos verticales o *scans*. En cada barrido, el LIDAR proyectaba el rayo láser sobre la vegetación con una determinada resolución angular (1° , en este caso),

completándose cada barrido cuando el rayo había recorrido un ángulo completo de 180° (el sensor se mantenía en todo momento a una altura constante sobre el suelo, H_g).

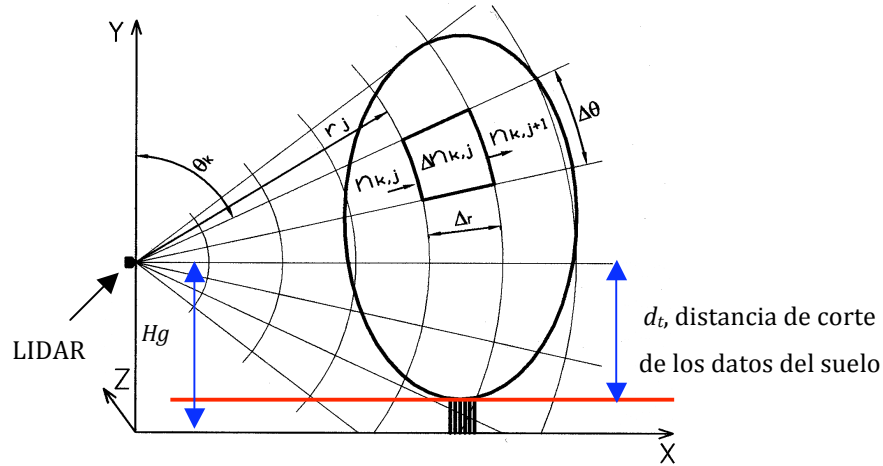


Figura 7. Representación esquemática de una celda polar bidimensional

Cada vez que el rayo láser había sido interceptado por la vegetación, el LIDAR determinaba la posición angular θ de dicho punto (habiéndose tomado como origen de ángulos el eje Oy en sentido horario) y la distancia polar, r , desde el punto de intercepción hasta el origen O . Para cada barrido o *scan*, la información obtenida eran las coordenadas polares (r, θ) de los distintos puntos interceptados, según un sistema de referencia en el que el sensor y el eje Oy actuaban, respectivamente, como origen (O) y como eje polar del sistema de coordenadas polares. A medida que el LIDAR se iba desplazando a lo largo de la hilera (eje Oz), el número de barridos verticales se incrementaba en función de la longitud de la zona escaneada.

Con todo, el número total M de parejas de datos (r, θ) en ningún caso excedió el valor

$$M = N \cdot \frac{180}{\alpha} \quad (1)$$

donde N era el número de barridos individuales realizados y α la resolución angular adoptada en la proyección del rayo láser ($\alpha = 1^\circ$). Igualmente, la longitud de vegetación (en mm) que había sido muestreada podía obtenerse como el producto

$$N \cdot \Delta z \quad (2)$$

siendo Δz la distancia (en mm) entre barridos o *scans* consecutivos.

Para el análisis posterior de los datos se recurrió a la metodología establecida por Walklate *et al.* (1997 y 2002), en la que los puntos interceptados de todo el volumen escaneado se proyectaban según la dirección del eje *Oz* sobre una malla bidimensional de celdas polares (fig. 7). Para la proyección de los puntos de intercepción y el análisis posterior de los datos se desarrolló una función específica en el entorno MATLAB (The MathWorks Inc., Natick, Massachussetts). Una descripción más detallada sobre esta función se muestra en el apartado 4.5 MultiScan V2.5: aplicación de MATLAB para el análisis de los datos del LIDAR.

La información inicial suministrada por el LIDAR era una matriz de datos (*LMS.Valores3D*). En esta matriz, las filas correspondían a los sucesivos barridos o *scans* realizados a lo largo de la hilera, y los datos de cada columna eran las distancias en mm, r , entre la vegetación interceptada y el LIDAR para cada uno de los ángulos de proyección del rayo láser. A partir de la matriz *LMS.Valores3D* y de la matriz *LMS.Ángulos* (matriz-fila con los valores de los ángulos θ en radianes que habían sido medidos según el sistema de referencia de la figura 5), se construyó finalmente la malla bidimensional de proyección que se muestra en la figura 7. Concretamente, la sección transversal del volumen de vegetación se dividió en celdas con incrementos angulares iguales, $\Delta\theta$ (rad), e incrementos radiales también iguales, Δr (mm).

En la figura 7 se muestra la localización de una celda genérica (k, j), cuyas coordenadas polares son el ángulo θ_k (rad)

$$\theta_k = \theta_l + (k - 1) \Delta\theta \quad k = 1, 2, \dots, K \quad (3)$$

y el radio (distancia al LIDAR) r_j (mm)

$$r_j = r_l + (j - 1) \Delta r \quad j = 1, 2, \dots, J_k \quad (4)$$

con lo que el volumen delimitado por la misma resulta ser

$$r_j \Delta\theta \Delta r N \Delta z \text{ (mm}^3\text{)} \quad (5)$$

Mediante la aplicación *MultiScan V2.5* se estableció, para cada celda, el número de intercepciones $\Delta n_{k,j}$ que se habían producido entre el rayo láser y la presencia de material vegetal en su trayectoria. Esta cantidad debía satisfacer la expresión,

$$\Delta n_{k,j} = n_{k,j} - n_{k,j+1}, \quad (6)$$

en la cual, $n_{k,j}$ era el número de rayos láser en la cara de entrada de la celda (k,j) y $n_{k,j+1}$ el número de rayos que conseguían atravesar la cara de salida de dicha celda y que, por tanto, entraban en la celda siguiente. El número de rayos que entraban en las primeras celdas o celdas más cercanas al LIDAR $(k,j=1)$ podía establecerse fácilmente al ser conocidos el número de barridos realizados a lo largo de la hilera, la resolución angular de la lectura del escáner y el incremento angular, $\Delta\theta$, de las celdas. La información del LIDAR se estructuró finalmente según dos matrices de datos: la matriz de intercepciones $(\Delta n_{k,j})$ y la matriz de rayos de entrada en cada celda $(n_{k,j})$. Es decir, la información sobre el cultivo quedaba reducida a una distribución bidimensional sobre el plano (Oxy) de las intercepciones del rayo láser con la vegetación, y a una distribución bidimensional sobre el mismo plano que reflejaba la atenuación que había sufrido el rayo láser en el interior de la vegetación. Posteriormente, y a partir de las dos matrices anteriores, se obtuvieron distintos parámetros vegetativos relacionados con la geometría y con la estructura foliar de las cepas (Sanz *et al.*, 2005a; Arnó *et al.*, 2006).

4.2.1 Obtención de parámetros relacionados con la geometría del cultivo

En los diferentes parámetros, se indica la presencia o ausencia de vegetación en cada celda mediante la función $\delta_{k,j}$, que podía tomar los valores,

$$\delta_{k,j} = 1 \quad \text{si} \quad \frac{\Delta n_{k,j}}{n_{k,j}} \geq p,$$

$$\delta_{k,j} = 0 \quad \text{si} \quad \frac{\Delta n_{k,j}}{n_{k,j}} < p,$$

siendo p un valor de referencia denominado *probabilidad de intercepción*. Al igual que Walklate et al. (2002), se tomó $p = 0,01$.

1) Altura de la vegetación (H)

La altura H del árbol (m) se estimó mediante la expresión,

$$H = H_g + \max \left(r_j \delta_{k,j} \sin \left(\frac{\pi}{2} - \theta_k \right) \right), \quad (7)$$

donde H_g era la altura del LIDAR sobre el suelo (m) y r_j (m) y θ_k (rad) las coordenadas polares de la celda (k,j).

2) Sección transversal de la vegetación (A)

Ésta era la sección (m^2) a lo largo del plano Oxy, donde r_j era la distancia polar (m), $\Delta\theta$ el incremento angular (rad) y Δr el incremento radial (m).

$$A = \Delta\theta\Delta r \sum_{K=1}^K \sum_{j=1}^{J_k} r_j \delta_{k,j}, \quad (8)$$

3) Volumen discretizado de la vegetación (V_D)

Éste era la suma de todos los volúmenes unitarios (m^3) correspondientes a cada *scan*, donde A_i era la sección transversal en el barrido y, Δz la anchura (mm) de un *scan* y N el número de *scans* efectuados.

$$V_D = \frac{\Delta z}{1000} \sum_{i=1}^N A_i. \quad (9)$$

4.2.2 Obtención de parámetros relacionados con la estructura vegetativa del cultivo

Antes de llegar a obtener los diferentes parámetros relacionados con la estructura vegetativa del cultivo. Se consideró, en primer lugar; que la probabilidad de transmisión del rayo láser en una celda genérica (k,j) podía establecerse como el cociente entre $n_{k,j+1}$ (cantidad de rayos de salida) y $n_{k,j}$ (cantidad de rayos de entrada),

$$T_{k,j} = \frac{n_{k,j+1}}{n_{k,j}} = 1 - \frac{\Delta n_{k,j}}{n_{k,j}}, \quad (10)$$

y, en segundo lugar, que dicha probabilidad, $T_{k,j}$, para distancias Δr suficientemente pequeñas, podía aproximarse mediante el modelo de probabilidad de Poisson o ley de Beer (Walklate et al., 1997 y 2002), resultando,

$$T_{k,j} = \exp(-\Delta r \cdot a_{k,j}) = \frac{1}{e^{\Delta r a_{k,j}}}. \quad (11)$$

A partir de esta expresión, era posible asignar a cada celda (k, j) un valor concreto del parámetro $a_{k,j}$, denominado densidad local de área del cultivo, [L^{-1}]. Este parámetro representaba una medida de la densidad de material vegetal (m^2/m^3) o cantidad de vegetación acumulada en la dirección Δr . Dada la relación existente entre la cantidad de vegetación presente y la superficie foliar proyectada en la dirección del rayo láser, $a_{k,j}$, se podía considerar como el cociente entre el área proyectada de cultivo y el volumen espacial que contenía a dicha vegetación. Combinando las dos expresiones anteriores, se obtuvo que el valor de la densidad local de área del cultivo correspondiente a una celda genérica (k, j), a partir de los datos suministrados por el LIDAR, podía expresarse según:

$$a_{k,j} = -\frac{1}{\Delta r} \ln T_{k,j} = -\frac{1}{\Delta r} \ln \left(1 - \frac{\Delta n_{k,j}}{n_{k,j}} \right). \quad (12)$$

Finalmente, con estos valores de densidad se construyeron tres índices o parámetros estructurales para la caracterización de la vegetación en viña (Walklate *et al.*, 2002): el *Crop Area Quotient* (CAQ), el *Tree Area Index* (TAI) y el *Tree Area density* (TAD). Aunque el parámetro TAD en el presente proyecto no se ha tenido en cuenta, ya que en los ensayos realizados por Arnó (2008), la predictibilidad del IAF con este parámetro era muy baja.

1) Crop area quotient (CAQ)- Porcentaje de área del cultivo

El *Crop Area Quotient* (CAQ) era un parámetro adimensional [L^0] que, para una celda genérica (k, j), se definía como el producto $\Delta r \cdot a_{k,j}$. Este producto venía a representar el porcentaje de área proyectada de cultivo en relación al área total proyectada del volumen o celda de control (k, j). El valor total de dicho porcentaje era, por tanto,

$$CAQ = \Delta r \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{J_k} a_{k,j} = - \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{J_k} \ln \left(1 - \frac{\Delta n_{k,j}}{n_{k,j}} \right). \quad (13)$$

2) Tree area index (TAI)

El *Tree Area Index* (TAI) se obtuvo sumando la cantidad de vegetación o área “captada” por el LIDAR en cada celda (área proyectada del cultivo en la dirección del rayo láser), dividiendo finalmente por el área total del terreno sobre el que se había realizado el barrido. El “área detectada” por el LIDAR en la celda (k, j) se podía obtener según la expresión,

$$ArN \frac{\Delta z}{1000} r_j \Delta \theta \delta_{k,j} a_{k,j}, \quad (14)$$

en la que los parámetros utilizados eran la distancia polar (r_j , en m), los incrementos angular ($\Delta \theta$, en rad) y radial (Δr , en m), el número de barridos realizados a lo largo de la hilera (N), la anchura correspondiente a un barrido o scan (Δz , en mm), y la densidad de área ($a_{k,j}$, en m^{-1}).

Aunque la expresión anterior tuviera dimensiones de superficie, no se trataba de la superficie foliar real, sino de la superficie captada por el LIDAR, la cual se interpretaba como un indicador de la cantidad de vegetación o área proyectada de material vegetal (hojas, madera y frutos) en la dirección del rayo láser. Al ser el área del terreno muestreado igual a $WN \frac{\Delta z}{1000}$ (donde W era la distancia entre hileras, en m), la expresión del Tree Area Index se podía escribir como,

$$TAI = \frac{\Delta r \Delta \theta}{W} \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{J_k} r_j \delta_{k,j} a_{k,j} = -\frac{\Delta \theta}{W} \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{J_k} r_j \delta_{k,j} \ln \left(1 - \frac{\Delta n_{k,j}}{n_{k,j}} \right) \quad (15)$$

El parámetro *TAI* era, por tanto, adimensional, $[L^0]$, y se formulaba de manera análoga al Índice de Área Foliar (IAF) aunque, probablemente, no presentasen el mismo valor. Asimismo, dada la posible intercepción del rayo con superficies vegetativas que no sean hojas, el *Tree Area Index* presentó valores no nulos cuando se escanearon cepas desnudas, es decir, cepas sin hojas (Arnó y Vallès, com. per.).

3) Tree area density (*TAD*)

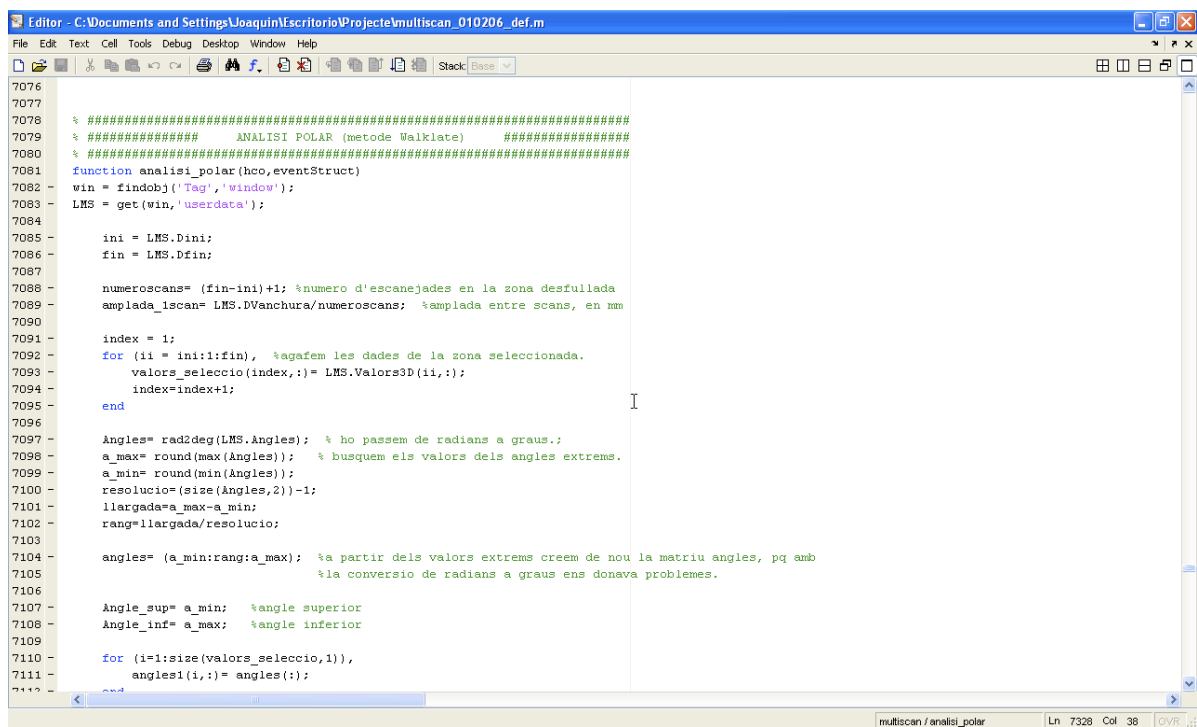
Combinando las expresiones (15) y (8), el *Tree Area Density* (*TAD*) presentaba dimensiones $[L^{-1}]$ y se calculaba mediante la expresión,

$$TAD = \frac{W \cdot TAI}{A} = \frac{-\sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{J_k} r_j \delta_{k,j} \ln \left(1 - \frac{\Delta n}{n_{k,j}} \right)}{\Delta r \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{J_k} r_j \delta_{k,j}} \quad (16)$$

En los tratamientos fitosanitarios en cultivos frutales (manzano) el *Tree Area Density* se había revelado como el parámetro estructural de mayor incidencia en la deposición foliar en estos cultivos (Walklate *et al.*, 2002). De ahí, la idoneidad de disponer de este parámetro para la dosificación de los productos fitosanitarios o, en su lugar, disponer de las densidades foliares normalizadas para distintos cultivares y estadios de desarrollo sobre los que referir las dosis de los productos fitosanitarios en técnicas de pulverización.

4.2.3 Multiscan V2.5: aplicación de MATLAB para el análisis de los datos del LIDAR

El análisis de los datos proporcionados por el LIDAR se realizó con la aplicación MultiScan V2.5 (MATLAB). A la programación inicial de la aplicación se añadió la función “análisis polar”, a partir de la cual se obtuvieron los diferentes parámetros vegetativos de las cepas siguiendo la metodología explicada en los apartados anteriores.



```
7076
7077
7078 % ##### ANALISI POLAR (metode Walklate) #####
7079 % #####
7080 % #####
7081 function analisis_polar(hco,eventStruct)
7082 win = findobj('Tag','window');
7083 LMS = get(win,'userdata');
7084
7085 ini = LMS.Dini;
7086 fin = LMS.Dfin;
7087
7088 numeroscans= (fin-ini)+1; %numero d'escanejades en la zona desfullada
7089 amplada_lscan= LMS.DVanchura/numeroscans; %amplada entre scans, en mm
7090
7091 index = 1;
7092 for (ii = ini:1:fin), %agafem les dades de la zona seleccionada.
7093     valors_seleccio(index,:) = LMS.Valors3D(ii,:);
7094     index=index+1;
7095 end
7096
7097 Angles= rad2deg(LMS.Angles); % ho passem de radians a graus.;
7098 a_max= round(max(Angles)); % busquem els valors dels angles extrems.
7099 a_min= round(min(Angles));
7100 resolucio=(size(Angles,2))-1;
7101 llargada=a_max-a_min;
7102 rang=llargada/resolucio;
7103
7104 angles= (a_min:rang:a_max); %a partir dels valors extrems creem de nou la matriu angles, pq amb
7105 %la conversio de radians a graus ens donava problemes.
7106
7107 Angle_sup= a_min; %angle superior
7108 Angle_inf= a_max; %angle inferior
7109
7110 for (i=1:size(valors_seleccio,1)),
7111     angles(i,:) = angles(:);
7112 end
```

Figura 8. Pantalla de programación de la función "Análisis Polar" en el entorno MATLAB

Para utilizar esta aplicación, en primer lugar, se había de ejecutar. Posteriormente, tal y como muestra la figura 9,

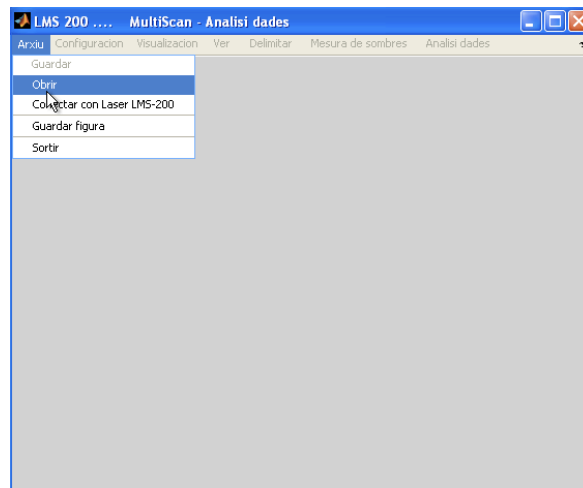


Figura 9. Menú "Archivo" de la aplicación Multiscan V2.5

se había de seleccionar con el menú "archivo" el fichero con extensión *.mscan que se iba a analizar. Una vez abierto el fichero, la aplicación generaba una representación de la zona escaneada (fig. 10).

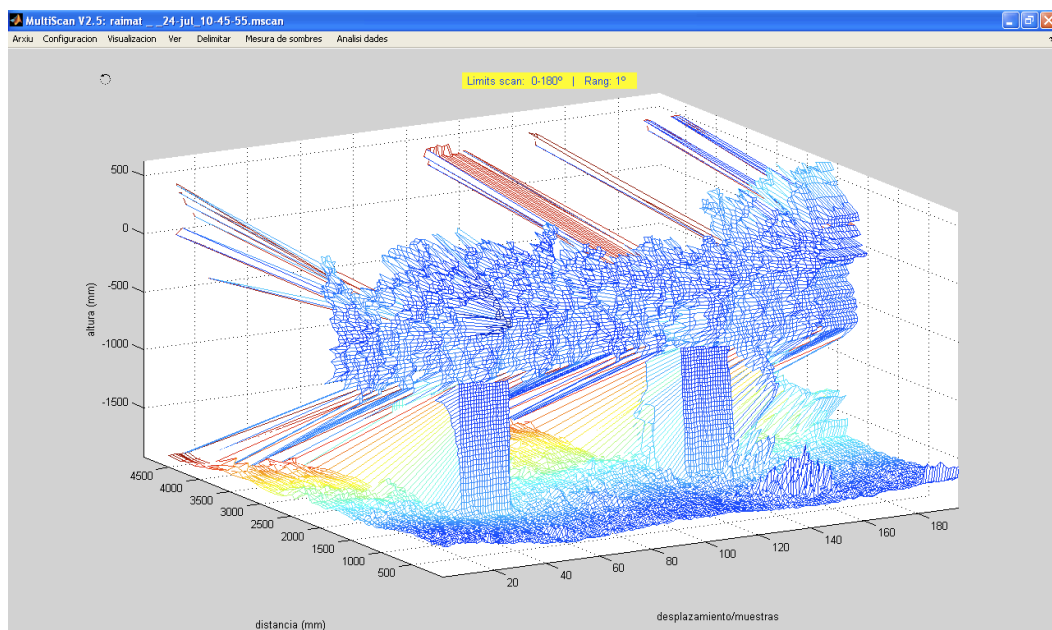


Figura 10. Imagen correspondiente a la zona escaneada

A continuación, se delimitaba la zona útil, definida tal y como muestra la figura 11. Para ello, se introducían los *scans* correspondientes al inicio y fin de la zona útil.

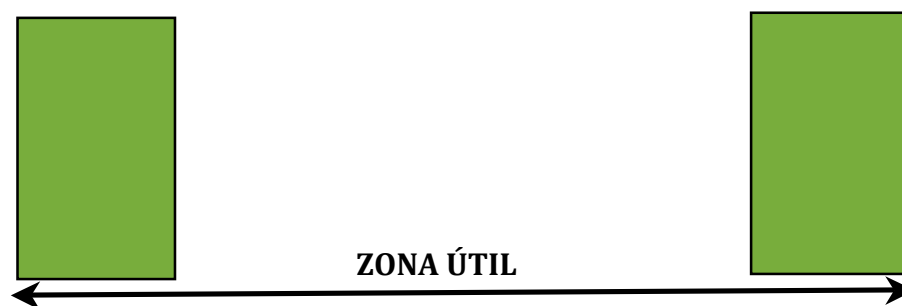


Figura 11. Representación esquemática de la zona útil

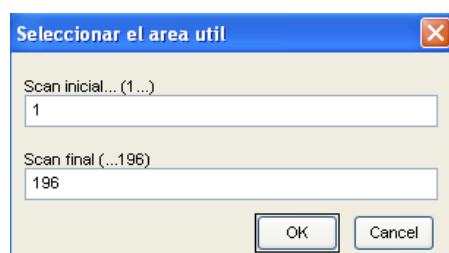


Figura 12. Ventana de selección de los *scans* inicio y fin de la zona útil

Una vez delimitada la zona útil, la aplicación generaba la imagen que se muestra a continuación (fig. 13).

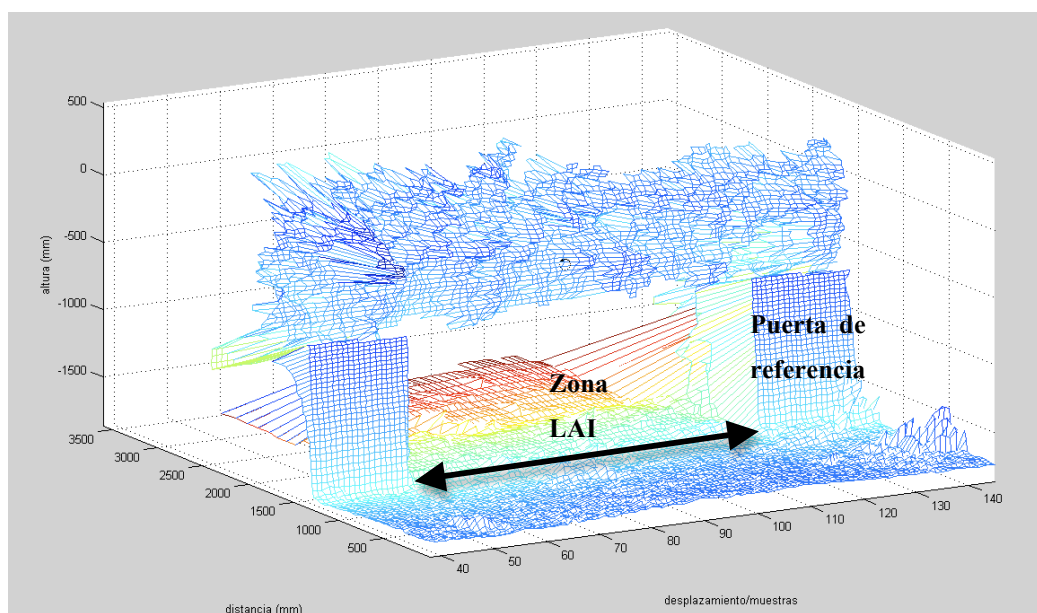


Figura 13. Representación de la zona útil

Finalmente, se delimitaba la zona LAI (fig. 14). Para ello, era necesario especificar en el cuadro de diálogo del programa los *scans* inicial y final de la zona LAI, la longitud de la zona LAI (mm), la distancia entre hileras (en mm) y, con respecto al

sensor, la altura del LIDAR sobre el suelo (mm), la distancia radial máxima a analizar (en mm) respecto a su posición y los incrementos angular ($\Delta\theta$, en grados sexagesimales) y radial (Δr , en mm) de las celdas de la matriz análisis o matriz bidimensional de proyección de los datos. Cabe decir que la anchura de la zona de defoliación (zona LAI) tenía los valores de 2000, 1000 o 500 mm según la franja de estudio que se llevaba a cabo. A continuación, se muestra el cuadro de diálogo correspondiente (fig. 15).



Figura 14. Representación esquemática de la zona LAI

Figura 15. Ventana de selección de la zona LAI

Una vez introducidos los valores correspondientes, el programa generaba la siguiente imagen (fig. 16):

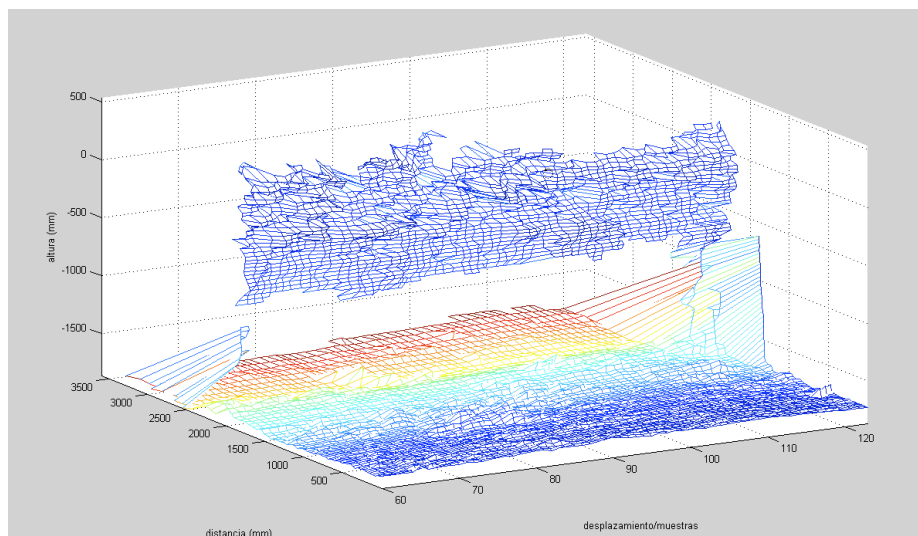


Figura 16. Representación de la zona LAI

Una vez que se habían delimitado las zonas útil y LAI, correspondientes a un fichero (*.mscan) determinado, se pasaba al análisis de los datos. Para ello, la aplicación tenía 3 opciones diferentes de análisis, aunque en el presente proyecto solamente se utilizaron dos de ellas. En la primera opción (*análisis de la zona defoliada*), los parámetros obtenidos (H , A , V , CAQ , TAI y TAD) correspondían a la totalidad de la zona de análisis (o zona LAI). Con la segunda opción (*scans individuales*), se calculaban los valores de los parámetros anteriores para cada uno de los scans o barridos realizados. Esta misma opción permitía calcular el volumen total discretizado de la vegetación (V_D) al sumarse los volúmenes individuales correspondientes a cada barrido.

El cuadro de diálogo correspondiente al análisis de los datos era común para las dos opciones. Los valores que se habían de especificar eran, la distancia entre hileras (mm), la distancia máxima de análisis respecto el LIDAR (mm), el incremento radial Δr (mm) y el incremento de ángulos deseado $\Delta\theta$ ($^\circ$). Estos valores eran constantes para cada fichero que se estaba analizando. Concretamente los valores correspondientes fueron 3000 mm, 3000 mm, 100 mm y 3° respectivamente. Finalmente, se debía especificar la denominada “distancia de corte” (d_t , en mm). Esta distancia (fig. 7), medida a partir de la posición en altura del LIDAR y hacia el suelo, permitía descartar del análisis los puntos que, en altura, se alejaban del sensor una distancia mayor que dicha distancia de corte. De este modo, se aseguraba que los puntos del suelo, cubierta

vegetal y del tronco de las cepas no fueran contabilizados en la matriz de proyección. En cada fichero de análisis este valor era diferente.

A continuación, se muestra el cuadro de diálogo del programa común para las dos opciones de análisis que se llevaron a cabo (fig. 17).

Figura 17. Cuadro de diálogo para la selección de los valores necesarios para el análisis de parámetros. El cuadro de diálogo, titulado "DETERMINAR ELS SEGÜENTS PARÀMETRES:", contiene los siguientes campos de entrada:

Parámetro	Valor
Distància entre fileres (mm):	3000
Distància màxima d'anàlisi respecte el LIDAR (mm):	3000
Interval de distància desitjat en l'anàlisi (mm):	100
Interval d'angles desitjat en l'anàlisi (°):	3
Distància de tall [dt] (mm):	1200

Al final del cuadro hay dos botones: "OK" y "Cancel".

Figura 17. Cuadro de diálogo para la selección de los valores necesarios para el análisis de parámetros

Una vez introducidos los valores correspondientes, la opción de *anàlisi de la zona defoliada* muestra los parámetros obtenidos en un cuadro como el siguiente (fig. 18):

Figura 18. Resultados correspondientes a cada parámetro. El cuadro de diálogo, titulado "PARAMETRES DE LA PLANTACIO:", muestra los resultados de los cálculos para los parámetros introducidos:

Parámetro	Valor
CAQ:	45.74
TAI:	1.487
TAD (m-1):	4.929
Alçada de l'arbre (m):	2.35
Secció transversal de l'arbre (m2):	0.905
Volum de l'arbre (m3):	1.811

Al final del cuadro hay dos botones: "OK" y "Cancel".

Figura 18. Resultados correspondientes a cada parámetro

Una vez se tenían los resultados correspondientes a la zona LAI se introducían los datos para la segunda opción de análisis (*scans individuales*). A continuación se muestra un recorte de los parámetros correspondientes a 11 scans de un fichero determinado,

Scan	CAQ	TAI	TAD	H	A	V
1	12.08	0.370	5.983	2.09	0.185	0.0116
2	12.49	0.376	7.752	2.14	0.146	0.0091
3	12.49	0.374	6.478	2.14	0.173	0.0108
4	12.49	0.370	5.343	2.14	0.208	0.0130
5	12.08	0.364	6.009	2.06	0.182	0.0114
6	12.08	0.366	5.680	2.06	0.193	0.0121
7	12.08	0.357	5.880	2.06	0.182	0.0114
8	12.08	0.350	6.557	2.04	0.160	0.0100
9	12.08	0.350	7.962	2.04	0.132	0.0082
10	10.29	0.301	5.648	1.97	0.160	0.0100
11	10.29	0.303	5.921	1.97	0.153	0.0096

Figura 19. Resultado de los diferentes parámetros calculados para cada *scan*

Finalmente, la aplicación calculaba el valor del volumen discretizado (fig. 20):

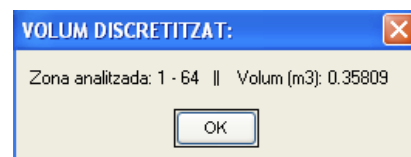


Figura 20. Resultado correspondiente al Volumen Discretizado (V_D)

4.3 Pruebas de campo

La estimación del área foliar en viña tuvo lugar en Raïmat, concretamente durante los días 24 y 25 de julio del año 2008. El lugar concreto donde tuvieron lugar las pruebas de campo con el LIDAR, fue en la finca Codorníu, parcela 44, Syrah, marco de plantación de 3 x 2 m.

Para realizar las pruebas se optó por definir 5 bloques de viña repartidos por diferentes lugares dentro de la misma parcela. Para la delimitación de los bloques se utilizó una estructura que le nombramos puertas de referencia. Cada bloque se definía como la distancia entre dos cepas consecutivas y por lo tanto era de dos metros.



Figura 21. Situación de las puertas de referencia en campo

Una vez colocadas las puertas de referencias se realizaron un total de cuatro pasadas con el LIDAR (dos por el lado izquierdo, I, y dos por el lado derecho, D, de la hilera). Éste se situó a una altura entre 1,63 y 1,71 m sobre el suelo y la velocidad de desplazamiento fue de 1 km/h, aproximadamente. El esquema operativo seguido es el que se muestra en la figura 22. En la tabla 2, se muestran los datos de los cinco ensayos realizados (número de bloque, código y coordenadas de la cepa de referencia).

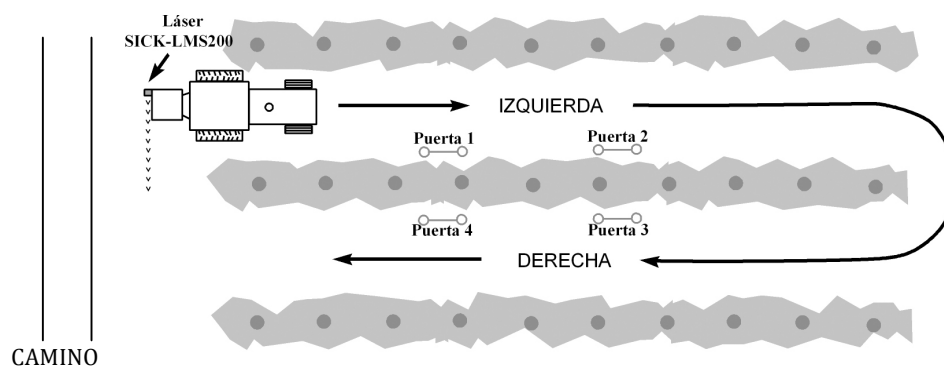


Figura 22. Esquema operativo del LIDAR en campo

Tabla 2. Ensayos de campo del LIDAR en Raimat, parcela 44, Syrah, año 2008

Altura LIDAR (m)	Bloque	Cepa de referencia		Cepas bloque	Distancia puertas (cm)		Archivos LIDAR	
		Código	Coordenadas		en Z	en X	Izquierda	Derecha
1,71	I	440119	GPS94 292349,34 4614756,378	19 - 19	199	104	100141 100534	100803 100924
	II	440315	GPS91 292432,29 4614827,21	15 - 15+	210	104	104555 104733	105703 105828
1,65	III	440311	GPS95 292451,76 4614904,8	11 - 11	214	104	110903 111030	111930 112134
1,65	IV	440511	GPS89 292502,94 4614876,634	11 - 11+	192	104	113706 113907	114752 114907
1,63	V	440615	GPS90 292512,55 4614793,095	15 - 15+	208	104	120926 121059	121714 121843

4.4 Determinación experimental del Índice de Área Foliar (IAF)

Una vez realizado el escaneo de los 5 bloques, tuvo lugar una defoliación manual (fig. 23). Siguiendo la metodología utilizada en pruebas anteriores al presente proyecto, se utilizó unos mástiles metálicos (fig. 24) que dividían la franja conjunta de 2 m en franjas de 0,5 m (franja 1, 2, 3, 4). De tal forma que ahora era posible calcular el IAF de la totalidad de la franja de 2 m, de las 2 franjas de 1 m y finalmente de las 4 franjas de 0,5 m. Las hojas defoliadas (figura 23) se colocaron en bolsas de plástico siguiendo el orden correcto de defoliación.



Figura 23. Defoliación manual de un bloque de estudio



Figura 24. División de un bloque en franjas de 0,5 m

Posteriormente, en el laboratorio del Centro de Mecanización Agraria (CMA) del DAR de la Generalitat de Catalunya, utilizando un Superficiador de Análisis de Imagen marca Delta-T Devices LTD (Area Measurement System, Conveyor Belt Unit), se realizó el superficiado de las hojas procedente de la defoliación de los 5 bloques. Como la cantidad de hojas era muy elevada, se optó por determinar el tamaño de la muestra

que fuera representativa de todo el conjunto de hojas procedentes de las diferentes franjas defoliadas.

La determinación del número de hojas que eran necesarias para la obtención de una muestra representativa de las diferentes franjas de vegetación se basó en el siguiente procedimiento:

1) Se tomó una *muestra piloto* de unas 30 hojas (32, para ser exactos) de una de las franjas del bloque 440615. Una vez superficiadas las hojas de dicha muestra, se calcularon la media muestral (\bar{x}) y la desviación típica de la muestra (\hat{s}) (desviación típica corregida) y, a partir de los dos anteriores, el Coeficiente de Variación (CV). Las fórmulas utilizadas fueron las siguientes:

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n} \quad (17)$$

$$\hat{s} = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (18)$$

$$CV = \frac{\hat{s}}{\bar{x}} 100 \quad (19)$$

2) Una vez conocido el Coeficiente de Variación de la muestra piloto, el tamaño muestral se calculó mediante la expresión que proporciona la amplitud (L) del intervalo de confianza $1 - \alpha$ ($\alpha = 0,05$), es decir, $L = z_{\alpha/2} \frac{\hat{s}}{\sqrt{n}}$. Operando adecuadamente resulta:

$$n = \frac{z_{\alpha/2}^2 CV^2}{E_R^2} \quad (20)$$

siendo, $E_R = 10$, el error relativo asumido (10%), $z_{\alpha/2} = 2$ ($\approx 1,96$), el valor de la variable normal estándar, y $CV = 49,50\%$, el valor resultante de la variabilidad de la *muestra piloto*. Sustituyendo los valores en la ecuación anterior, el número de hojas que debían tomarse en cada muestra debería ser como mínimo de $n = 98$, o, lo que es lo mismo, un peso aproximado de muestra de 268 g.

3) La superficie foliar total de cada franja, S_i (cm^2), se obtenía a partir de la superficie medida de la muestra, S_{im} (cm^2), y de los pesos respectivos de hojas de la muestra, P_{im} (g), y del total de la franja, P_i (g):

$$S_i = S_{im} \frac{P_i}{P_{im}} \quad (21)$$

4.5 Análisis estadístico de los resultados

Una vez obtenidos los valores correspondientes a los diferentes parámetros (longitud escaneada de 2000 mm), se trató de encontrar una relación entre el Índice de Área Foliar (IAF o LAI) y los parámetros del LIDAR. Para ello se optó por realizar un análisis de regresión simple. De tal manera que el Índice de Área Foliar se tomó como variable dependiente y los parámetros del LIDAR como variables independientes o explicativas. El modelo de regresión lineal que se formuló fue el siguiente,

$$\text{IAF} = \beta_0 + \beta_1 \cdot \text{LIDAR} \quad (22)$$

siendo IAF el Índice de Área Foliar (m^2/m^2), LIDAR el parámetro geométrico o estructural considerado (con sus unidades correspondientes), y β_0 y β_1 los coeficientes del modelo obtenidos mediante el ajuste por el método de mínimos cuadrados. En todos los casos, la capacidad predictiva del modelo (bondad final del ajuste) se comprobó mediante el coeficiente de determinación (R^2).

Los análisis de regresión se realizaron mediante Microsoft Excel 2007.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Determinación del Índice de Área Foliar (IAF)

Tal y como se ha comentado en apartados anteriores, la defoliación de los 5 bloques de estudio se hizo en franjas de 2, 1 y 0,5 metros. De tal forma que se obtuvo un total de 4 medidas por bloque, con un total de 20 valores de *IAF* entre los 5 bloques. Respecto a pruebas realizadas en años anteriores (Arnó 2008), en esta campaña no se tuvo en cuenta el lado de la hilera. En las tablas que se encuentran a continuación, se muestran los valores obtenidos de *IAF* y superficie foliar en las diferentes franjas de los 5 bloques.

Tabla 3. Superficie foliar e Índice de Área Foliar (IAF) en viña, cv. *Syrah*, ensayo de defoliación del bloque I

CEPA	MEDIDAS EXPERIMENTALES	FRANJA 1	FRANJA 2	FRANJA 3	FRANJA 4
440119	Superficie foliar (cm ²)	14435	14885	19375	23636
	LAI en cada franja	0,9623	0,9923	1,2917	1,5757
	LAI cada dos franjas	0,9773		1,4337	
	LAI total	1,2055			

Tabla 4. Superficie foliar e Índice de Área Foliar (IAF) en viña, cv. *Syrah*, ensayo de defoliación del bloque II

CEPA	MEDIDAS EXPERIMENTALES	FRANJA 1	FRANJA 2	FRANJA 3	FRANJA 4
440315	Superficie foliar (cm ²)	29270	27844	23371	19301
	LAI en cada franja	1,9513	1,8563	1,5581	1,2867
	LAI cada dos franjas	1,9038		1,4224	
	LAI total	1,6631			

Tabla 5. Superficie foliar e Índice de Área Foliar (IAF) en viña, cv. *Syrah*, ensayo de defoliación del bloque III

CEPA	MEDIDAS EXPERIMENTALES	FRANJA 1	FRANJA 2	FRANJA 3	FRANJA 4
440311	Superficie foliar (cm ²)	18892	23897	24676	25692
	LAI en cada franja	1,2595	1,5931	1,6451	1,7128
	LAI cada dos franjas	1,4263		1,6789	
	LAI total	1,5526			

Tabla 6. Superficie foliar e Índice de Área Foliar (IAF) en viña, cv. *Syrah*, ensayo de defoliación del bloque IV

CEPA	MEDIDAS EXPERIMENTALES	FRANJA 1	FRANJA 2	FRANJA 3	FRANJA 4
440511	Superficie foliar (cm ²)	16061	13410	14141	9834
	LAI en cada franja	1,0707	0,8940	0,9427	0,6556
	LAI cada dos franjas	0,9824		0,7992	
	LAI total	0,8908			

Tabla 7. Superficie foliar e Índice de Área Foliar (IAF) en viña, cv. *Syrah*, ensayo de defoliación del bloque V

CEPA	MEDIDAS EXPERIMENTALES	FRANJA 1	FRANJA 2	FRANJA 3	FRANJA 4
44065	Superficie foliar (cm ²)	29975	30146	23502	23402
	LAI en cada franja	1,9983	2,0097	1,5668	1,5601
	LAI cada dos franjas	2,0040		1,5635	
	LAI total	1,7838			

5.2 Uso del LIDAR para la predicción del Índice de Área Foliar

Una vez obtenidos los diferentes valores del *IAF* (según franjas), mediante la aplicación *MultiScan V2.5* se obtuvieron los parámetros vegetativos siguientes: altura de la vegetación (*H*), sección transversal (*A*) y volumen (*V* y *V_D*) de las cepas y, como parámetros relacionados con la distribución de la densidad foliar, el *Crop Area Quotient (CAQ)*, el *Tree Area Index (TAI)* y el *Tree Area Density (TAD)*.

Las características de funcionamiento del LIDAR y la configuración utilizada para el análisis de los datos se muestran en la tabla 8. Cabe indicar que los parámetros de la tabla se obtuvieron al proyectar sobre la malla bidimensional de análisis el total de los barridos efectuados a lo largo del bloque (o una longitud total escaneada de vegetación de 2000 mm).

REGRESIONES DE 0 A 2 M (Tabla 8)

GRÁFICO 1 DE 0 A 2 M (Véase PDF adjunto)

Analizando los resultados de la tabla 8, se observó que la altura de las cepas estaba comprendida entre 2,17 y 2,39 m. Los valores correspondientes al área transversal de las cepas se mantuvieron en el intervalo de 0,649 y 0,967 m². Finalmente, en cuanto al volumen de la copa, los valores oscilaron entre 1,297 y 1,934 m³.

Por lo que se refiere a los parámetros estructurales, el intervalo en que se encontraban los valores correspondientes al *Tree Area Index (TAI)* fue entre 0,686 y 1,674. Los valores obtenidos para el *TAI* se mostraron muy parecidos a los del *IAF*. Debido a que el *TAI* se había formulado de manera análoga al Índice de Área Foliar (*IAF*). El *Crop Area Quotient (CAQ)* presentó los valores entre 20,69 y 55,94. Por lo general, se cumplió que al aumentar la superficie foliar de las cepas (*IAF*) también aumentaban proporcionalmente los valores de los diferentes parámetros (gráfico 1). Según el análisis de regresión, los parámetros vegetativos que mejor se ajustaron en la predicción de la superficie foliar fueron la altura ($R^2 = 0,54$) y el volumen discretizado ($R^2 = 0,65$).

Respecto a los parámetros estructurales, la predicción fue muy parecida a los parámetros anteriores, siendo el coeficiente de determinación $R^2 = 0,58$ en el caso del *Crop Area Quotient* y $R^2 = 0,65$ en el *Tree Area Index*.

Con todo, la serie de datos analizada era muy reducida. Se disponía únicamente de 5 valores del *IAF* para los valores de los parámetros del LIDAR. El análisis de franjas de vegetación de menor longitud (franjas de 1 m) permitió la obtención de un mayor número de datos (tabla 9), disponiéndose de 40 valores de cada uno de los parámetros del LIDAR, y de 10 valores del *IAF*. Para franjas de 1 m de longitud, los 10 valores del *IAF* correspondientes a los diferentes bloques, se relacionaron con los archivos LIDAR según el esquema que se encuentra a continuación (fig. 25).

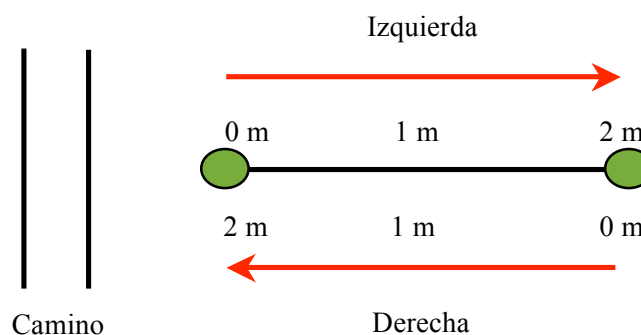


Figura 25. División de un bloque en franjas de 1 m

TABLA 9 (Véase PDF adjunto)

GRAFICO 2 DE 0 A 1 M (Véase PDF adjunto)

A partir de los análisis de regresión (gráfico 2), se puso de manifiesto la disminución de la bondad del ajuste en los parámetros geométricos (H , A , V y V_D), debido probablemente a la mayor variabilidad por el aumento de las parejas de datos. Por el contrario, en el caso de los parámetros estructurales (CAQ y TAI), la bondad de ajuste para franjas de 1 m de longitud fue mayor que en el caso anterior (franjas de 2 m). Concretamente, los valores del coeficiente de determinación del CAQ y del TAI fueron respectivamente, $R^2 = 0,68156$ y $R^2 = 0,73556$.

Finalmente, se decidió aumentar la serie de datos dividiendo cada uno de los bloques en franjas de 0,5 m de longitud. Así se obtuvieron 20 valores de IAF que, junto con las 4 pasadas del LIDAR (2 por la derecha y 2 por la izquierda), generaron un total de 80 parejas de puntos. Los parámetros del LIDAR son los que se muestran en la tabla 10. Las rectas de regresión se muestran en el gráfico 3.

TABLA 10 (Véase PDF adjunto)

TABLA 10 (CONTINUACIÓN) (Véase PDF adjunto)

GRÁFICO 3 DE 0 A 0,5 M (Véase PDF adjunto)

Para franjas de 0,5 m de longitud, los parámetros que tuvieron mayor bondad de ajuste en la predicción del Índice de Área Foliar (IAF) fueron nuevamente los parámetros estructurales *CAQ* y *TAI*. Concretamente, el coeficiente de determinación correspondiente a cada parámetro fue, respectivamente, $R^2 = 0,61187$ y $R^2 = 0,66449$.

Debido a que en los análisis de regresión simple el parámetro del LIDAR que ha mostrado una mejor capacidad de predicción del Índice de Área Foliar (IAF) ha sido el *Tree Area Index* (TAI), de ahora en adelante el análisis se centrará únicamente entorno a este parámetro.

Centrándonos ahora en los modelos de predicción del *IAF* con los coeficientes de determinación más elevados (franjas de 0,5 m y 1m) existen diferencias sustanciales entre ambos modelos. Concretamente, el coeficiente de regresión del *TAI* $\sim 1,10$ en tramos de 1 m y $\sim 1,53$ en tramos de 0,5 m. Al haberse formulado el *TAI* como un índice de área foliar (superficie foliar/superficie de suelo), hacía que fuese mayormente creíble un coeficiente de regresión cercano a la unidad. La interpretación final de este resultado sería la necesidad de escanear con el LIDAR una longitud mínima de 1 m, con el objetivo de acumular el número suficiente de barridos para la estimación adecuada de la superficie foliar.

Una vez comprobada la relación existente entre el Índice de Área Foliar (IAF) y el parámetro *TAI* mediante un gráfico de dispersión (coeficiente de correlación lineal de Pearson de 0,8054 para franjas de 2 m, 0,8577 para franjas de 1 m y 0,8152 para franjas de 0,5 m) se llevó a cabo la modelización de la relación lineal mediante un análisis de regresión simple del tipo $IAF = \beta_0 + \beta_1 \cdot TAI$. Finalmente, se decidió profundizar en los análisis de regresión para el parámetro *TAI*. Debido a que en los análisis de regresión realizados se supusieron las hipótesis de normalidad, linealidad y homocedasticidad, mediante el uso del programa JMP se hizo un análisis de residuos para comprobar si realmente las hipótesis supuestas se cumplían y por lo tanto hasta que punto los modelos obtenidos eran fiables.

A continuación, se muestran los gráficos y las tablas obtenidas con el JMP para franjas de 2 m, 1 m y 0,5 m, respectivamente.

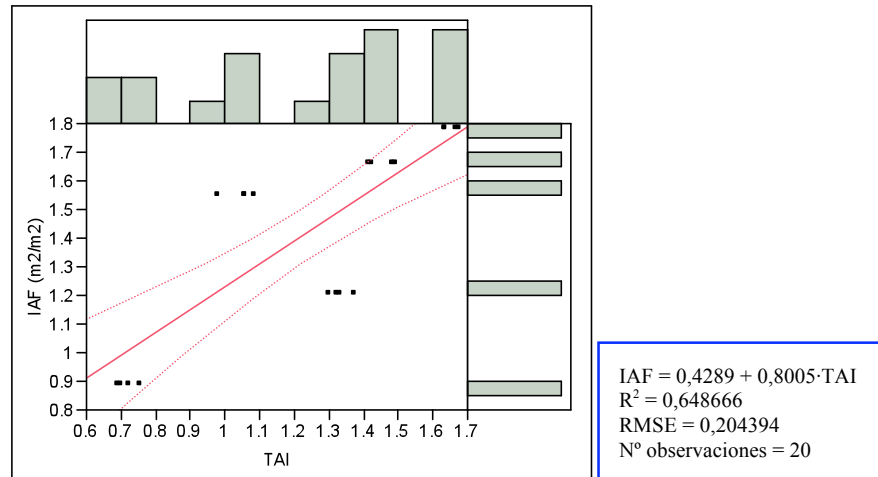


Gráfico 4. Modelización del IAF en función del TAI para franjas de 2 m

El gráfico 4 muestra para franjas de 2 metros la relación lineal existente entre la variable respuesta *IAF* y la variable explicativa *TAI*. Concretamente, la variable *TAI* explica aproximadamente un 65 % de la variabilidad del *IAF* ($R^2 = 0,64867$). También se representan las bandas de confianza de la predicción del *IAF* y el valor de la desviación típica de la varianza residual de la regresión (Root Mean Square Error, RMSE = 0,2044).

En el gráfico 5 se muestran los residuos sobre los valores predichos. Dado que la variable respuesta (*IAF*) sólo toma 5 valores diferentes, se obtienen 5 rectas paralelas de pendiente -1. El gráfico es poco informativo en este caso, las hipótesis de normalidad y homocedasticidad no son aplicables. Con todo, la hipótesis de linealidad se cumple al no haber ninguna tendencia determinada en la distribución de los residuos.

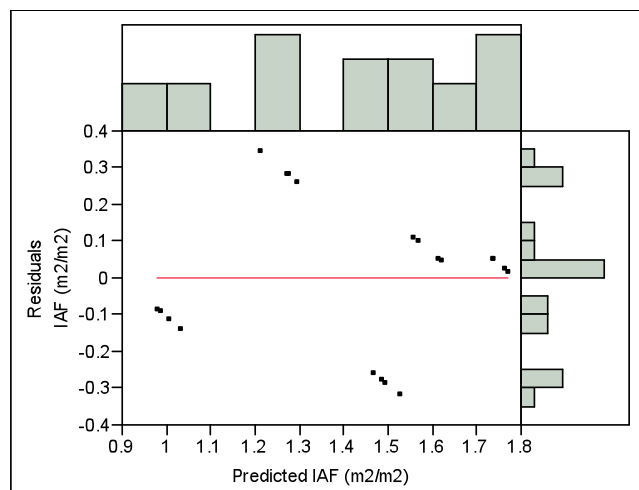


Gráfico 5. Análisis de residuos para franjas de 2 m

En el gráfico 6 se muestra el análisis de regresión para franjas de 1 m. En este caso el coeficiente de determinación es mayor ($R^2 = 0,7355$) que para franjas de 2 m. La representación de las bandas de confianza del IAF para franjas de 1 m es más estrecha que en franjas de 2 m. Concretamente el valor del $RMSE = 0,1999$ demuestra que la varianza residual ha disminuido respecto al caso anterior. En el análisis de residuos del gráfico 7, se observa una tendencia similar a la del gráfico 5. Siendo poco fiable la interpretación de las hipótesis, la ausencia de una tendencia de la distribución de los residuos demuestra nuevamente el cumplimiento de la hipótesis de linealidad. Finalmente, el modelo parece heterocedástico (varianzas desiguales), aunque es algo precipitado concluir algo al respecto.

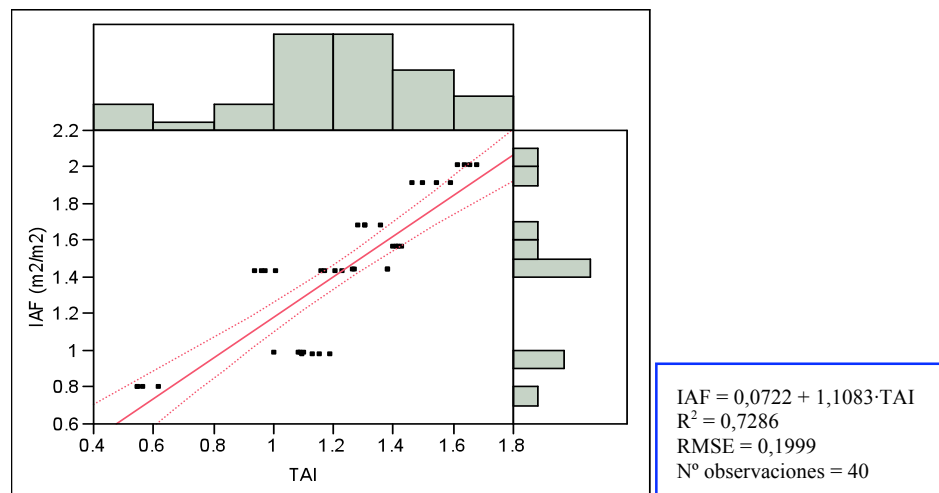


Gráfico 6. Modelización del IAF en función del TAI para franjas de 1 m

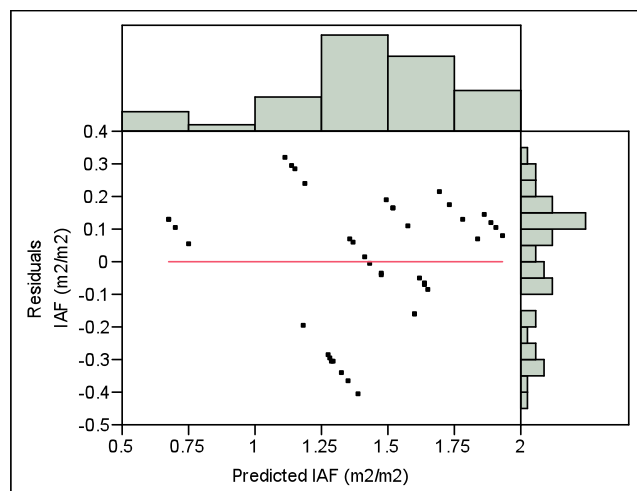


Gráfico 7. Análisis de residuos para franjas de 1 m

Para franjas de 0,5 m, el análisis de regresión (gráfico 8) muestra un ajuste aceptable de los datos al modelo ($R^2 = 0,6602$). En este caso, el valor de la varianza residual (RMSE = 0,2301) es algo superior a los dos casos anteriores. El análisis de los residuos se muestra en el gráfico 9. A pesar de tener un total de 80 puntos, únicamente hay 20 valores distintos del *IAF*, lo cual produce una distribución de los residuos según 20 rectas paralelas y de pendiente -1. En este caso, al igual que en los anteriores, parece cumplirse la hipótesis de linealidad y el gráfico es poco informativo acerca de la normalidad y la homocedasticidad de las observaciones.

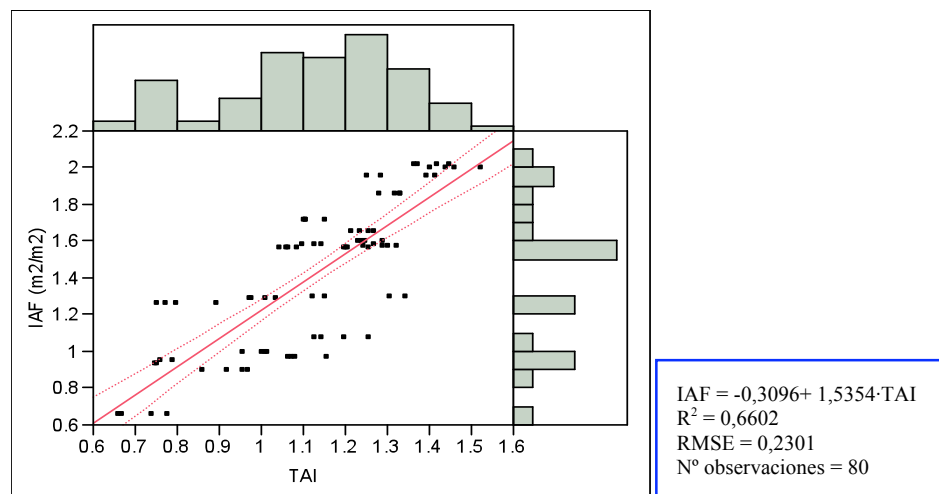


Gráfico 8. Modelización del IAF en función del TAI para franjas de 0,5 m

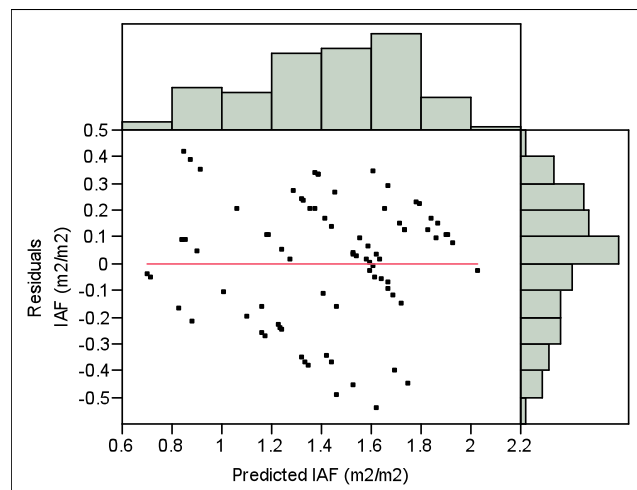


Gráfico 9. Análisis de residuos para franjas de 0,5 m

Tabla 11. Comparación de los modelos de regresión simple obtenidos en viña cv. *Syrah* para franjas de 0,5 m, 1 m y 2m

Anchura	Significación del modelo	R ²	Coeficiente* β_0	Coeficiente* β_1	I.C. 95,0% para β_1	
					Inferior	Superior
2 m	<.0001	0,6487	0,4290 (0,1777)	0,8005 (0,1389)	0,5088	1,0922
1 m	<.0001	0,7356	0,0722 (0,1348)	1,1083 (0,1078)	0,8905	1,3260
0,5 m	<.0001	0,6645	-0,3096 (0,1414)	1,5354 (0,1235)	1,2884	1,7824

Tal y como se muestra en la tabla 11, el contraste de la regresión demuestra que los 3 modelos obtenidos para cada una de las franjas son significativos ($p < 0,0001$) y, por tanto, la relación lineal existente entre el *TAI* y el *IAF* es significativa. Aunque resulta que en franjas de 2 m y 0,5 m, a pesar de que los modelos sean significativos, el elevado número de *scans* frente al bajo número de parejas en el primer caso (2 m) y el elevado número de parejas de puntos frente al bajo número de *scans* acumulados en el segundo caso (0,5 m), implica que los coeficientes de determinación en ambos casos sean inferiores en comparación al obtenidos en franjas de 1 m. Aunque a pesar de todo, el nivel de predicción de los 3 modelos a partir del *TAI*, explica entre un 65% y un 75% de la variabilidad del *IAF*.

Posteriormente, se planteó la pregunta de si realmente había mucha diferencia en la predicción del *IAF* a partir de las rectas de regresión de cada uno de los modelos obtenidos. Para la comparación de los 3 modelos de regresión se han utilizado los intervalos de confianza del coeficiente de regresión (β_1). Además, se han representado las 3 rectas de regresión en base a la simulación de diferentes valores del *TAI* (gráfico 10).

Tal y como muestra el gráfico 10 las franjas más estrechas (0,5 m) presentan una pendiente mayor. A medida que aumenta la longitud de la franja escaneada, disminuye la pendiente de la recta de regresión. Asimismo, en el caso de franjas de 1 m el valor de la pendiente se aproxima a 1, lo cual era mayormente esperable dada la formulación del parámetro *Tree Area Index* (*TAI*). Por otro lado, los intervalos de confianza demuestran que a pesar de que haya diferencias entre los 3 modelos, en el caso de franjas de 1 m y 2

m los modelos presentan una mayor similitud entre sí; en cambio, el modelo para franjas de 0,5 m queda más alejado de los modelos anteriores.

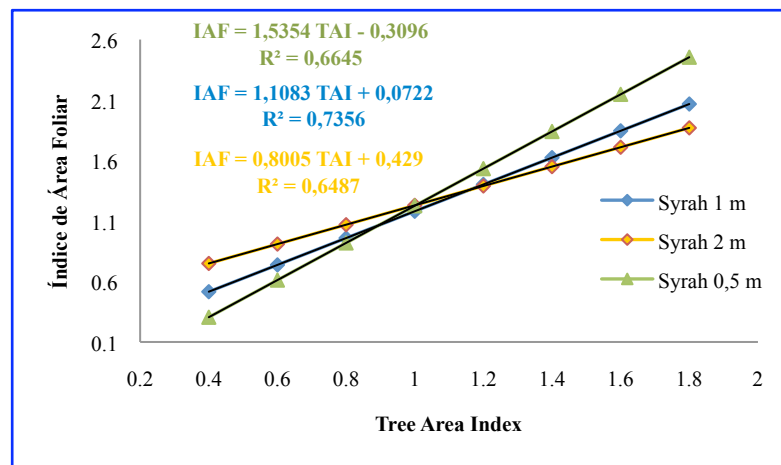


Gráfico 10. Simulación de la predicción del IAF a partir del TAI para franjas de 0,5 m, 1 m y 2 m.

Finalmente, debido a que el mejor modelo para la predicción del *IAF* a partir del *TAI* tenía lugar en franjas de 1 m, se decidió analizar si había algún tipo de relación entre los resultados obtenidos en el presente trabajo (Syrah) con los obtenidos por Arnó en Merlot (2008), o bien, existían diferencias sustanciales entre ambos modelos. Para ello, se graficaron mediante simulación las rectas de regresión de ambos modelos (gráfico 11), comparándose asimismo los intervalos de confianza (IC) del coeficiente de regresión (tablas 11 y 12).

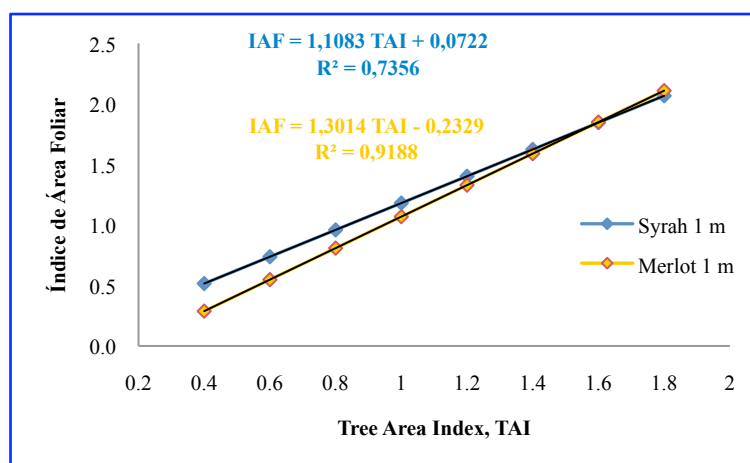


Gráfico 11. Comparación de las rectas de regresión para la predicción del IAF a partir del TAI

Tabla 12. Modelo de regresión simple obtenido por Arnó (2008) en viña cv. *Merlot* para franjas del 1 m

Anchura	Significación del modelo	R ²	Coeficiente* β_0	Coeficiente* β_1	I.C. 95,0% para β_1	
					Inferior	Superior
1 m	<.0001	0,9188	-0,2329 (0,0566)	1,3014 (0,1388)	1,2032	1,3996

A partir de los IC de cada uno de los modelos y su representación gráfica, se demuestra que realmente existe una relación entre los dos modelos de predicción a pesar de que existan diferencias. Sin embargo, a pesar de que ambos modelos sean significativos, realmente el elevado valor del coeficiente de determinación ($R^2 = 0,9188$) y la menor amplitud del IC, corroboran que la capacidad de predicción del *IAF* a partir del *TAI* en el modelo de Arnó (2008) es superior a la obtenida en el presente trabajo.

5.3 Predicción del Índice de Área Foliar mediante teledetección remota. Comparación con el sensor LIDAR

Hasta aquí, todo el trabajo se ha centrado en la predicción del *IAF* a partir del uso de un sensor láser (LIDAR). Pero, tal y como se comentó en los antecedentes del presente proyecto, existe también la posibilidad de predecir la superficie foliar de las cepas a partir de la reflectancia espectral del cultivo detectada mediante fotografía aérea digital. Las cuestiones que se plantean son: ¿qué tipo de sensor (láser terrestre o fotografía aérea) presenta mayor capacidad de predicción del Índice de Área Foliar? Y, en todo caso, ¿mejora la predicción del *IAF* la integración de ambas tecnologías?

Para ello, se compararon los modelos de predicción del *IAF* a partir del *TAI* para franjas de 0,5 m, 1 m y 2 m, con los modelos basados en el parámetro *NDVI* (*Normalized Difference Vegetation Index*) (fig. 26), el cual se había obtenido a partir de la reflectancia espectral de una fotografía aérea digital, analizada por el "Servei Científicotècnic de la UDL: Sistemes de Informació Geogràfica i Teledetecció (Sigtel)".

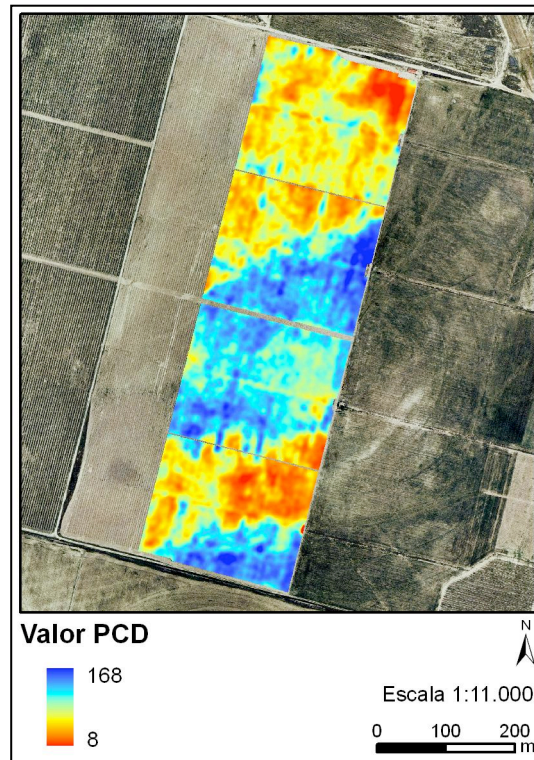


Figura 25. Índice de vegetación *PCD* (*Plant Cell Density*, IR/R) de la parcela P44, Syrah, Raimat (Lleida)

En el gráfico 12 se encuentra la respuesta a la primera pregunta formulada anteriormente. Para cualquier tipo de franja (2 m, 1 m y 0,5 m), la mayor capacidad de predicción del *IAF* se obtiene con los modelos formulados a partir del parámetro *Tree Area Index* (TAI). Por lo tanto, el LIDAR ha presentado una mayor capacidad de predicción del *IAF*, frente a la proporcionada mediante teledetección a partir de una fotografía aérea digital. Sin duda, el hecho de que el LIDAR sea un sensor cercano al cultivo y con capacidad para realizar un escaneo vertical son factores determinantes para conseguir una mayor resolución, prestaciones y capacidad de predicción frente a los sensores remotos.

La mayor predicción del *IAF* tenía lugar en franjas de 1 m. A partir de este modelo se planteó añadir la información proporcionada por el *NDVI* para ver si sumando la información proporcionada por ambas tecnologías de detección, la capacidad de predicción aumentaba. Para ello, se llevó a cabo un análisis de regresión múltiple del tipo $IAF = \beta_0 + \beta_1 \cdot TAI + \beta_2 \cdot NDVI$ para franjas de 1m.

GRÁFICO 12 NDVI \Leftrightarrow TAI (Véase PDF adjunto)

Tal y como muestra la tabla 13, el contraste de la regresión es significativo y por tanto existe una relación lineal significativa entre la variable respuesta (IAF) y las variables explicativas (TAI y NDVI). Pero analizando los niveles de significación de los coeficientes de regresión de ambas variables (tabla 13), se observa que el coeficiente de regresión β_2 , que acompaña a la variable *NDVI*, es no significativo ($p = 0,7514$). Cumpliéndose así la hipótesis nula ($\beta_2 = 0$) y, por tanto, siendo mínima la contribución a la explicación de la variable respuesta (IAF). Además, el coeficiente β_2 presenta un valor negativo (- 0,5119), lo cual contradice la relación supuestamente directa entre el *IAF* y el *NDVI*. En definitiva, el índice de vegetación *NDVI* no es un buen predictor de la superficie foliar de las cepas en comparación con el parámetro *TAI* del sensor láser (la regresión lineal paso a paso, *stepwise regression*, descartó la variable *NDVI* por su mínima contribución a la predicción del Índice de Área Foliar, IAF).

Tabla 13. Modelo de regresión múltiple obtenido en viña cv. *Syrah* para franjas de 1 m

Anchura	Significación del modelo	R^2	Coeficiente β_0	Coeficiente β_1	Coeficiente β_2
1 m	0,0148	0,6998	0,0477	1,2370 *	- 0,5119 ns

6. CONCLUSIONES

1) El *Tree Area Index* (TAI) es el parámetro del LIDAR que ha mostrado una mayor capacidad de predicción del Índice de Área Foliar (IAF). Concretamente, el *Tree Area Index* (TAI) ha permitido explicar el 64,87%, el 73,56% y el 66,45% de la variabilidad de la superficie foliar existente en franjas de 2 m, 1 m y 0,5 m respectivamente.

2) El modelo de regresión lineal entre el Índice de Área Foliar y el *Tree Area Index* (TAI) varía en función de la longitud de la franja escaneada. Al aumentar dicha longitud, disminuye el coeficiente de regresión del modelo.

3) La bondad de ajuste de los modelos ha sido mayor en franjas de 1 m de longitud. Se recomienda, por tanto, que la longitud mínima recomendable para obtener una mejor predicción del Índice de Área Foliar (IAF) sea de 1 m. Cuando se escanean longitudes menores (0,5 m) no se acumula un número suficiente de barridos para la correcta interpretación de la superficie foliar.

4) El modelo de regresión IAF-TAI para franjas de 1 m es similar al modelo propuesto por Arnó (2008). Sin embargo, la distinta capacidad de predicción entre ambos modelos sugiere probablemente la existencia de otras variables (variedad, sistema de formación, etc.) que deberían introducirse en un modelo general de regresión.

5) El parámetro *Tree Area Index* (TAI), obtenido con el LIDAR, presenta una mayor capacidad de predicción del Índice de Área Foliar (IAF) frente a la proporcionada mediante teledetección (NDVI, *Normalized Difference Vegetation Index*). En definitiva, el LIDAR es un sensor adecuado para la estimación de la superficie foliar en viticultura.

7. BIBLIOGRAFÍA CITADA

- Adamchuk, V.I., Hummel, J.W., Morgan, M.T. y Upadhyaya, S.K. 2004. *On-the-go soil sensors for precision agriculture*. Computers and Electronics in Agriculture, **44**, 71-91.
- Arkun, S., Honey, F., Johnson, L., Lamb, D., Lieff, W. y Morgan, G. 2000. *Airborne remote sensing of the vine canopy*. In: Vineyard monitoring and management beyond 2000, Cooperative Research Centre for Viticulture, National Wine and Grape Industry Centre, Charles Sturt University, Wagga Wagga, Australia, D. Lamb (ed.).
- Arnó, J., Bordes, X., Ribes-Dasi, M., Blanco, R., Rosell, J.R. y Esteve, J. 2005a. *Obtaining grape yield maps and analysis of within-field variability in Raimat (Spain)*. In: Precision Agriculture'05. Proceedings of the Fifth Euro-pean Conference on Precision Agriculture, edited by J.V. Stafford, (Wageningen Academic Publishers, Wageningen, The Netherlands), p. 899-906.
- Arnó, J., Martínez-Casasnovas, J.A., Blanco, R., Bordes, X. y Esteve, J. 2005b. *Viticultura de precisió a Raimat (Lleida): experiències durant el període 2002-2004*. ACE-Revista d'Enologia, **73**, 12-17.
- Arnó, J. 2008. Variabilidad intraparcelsaria en vinya y uso de sensores láser en viticultura de precisió. Tesis Doctoral, Universitat de Lleida, Lleida, p. 236.
- Arnó, J., Vallès, J.M., Llorens, J., Blanco, R., Palacín, J., Sanz, R., Masip, J., Ribes-Dasi, M. y Rosell, J.R. 2006. *Ground laser scanner data analysis for Leaf Area Index (LAI) prediction in orchards and vineyards*. XVI CIGR World Congress - AgEng Bonn 2006 - 64th VDI-MEG International Conference Agricultural Engineering - FAO Workshop Global Issues, Bonn, CD-ROM, Paper 214.
- Bastida, R., Barreiro, P. y Valero, C. 2006. *On-board sensors for vine harvesters*. Paper 566. XVI CIGR World Congress - AgEng Bonn 2006 - 64th VDI-MEG International Conference Agricultural Engineering - FAO Workshop Global Issues, Bonn, CD-ROM.

- **Bordes, X.** 2004. *Obtenció de mapes de collita i anàlisi de la variabilitat intraparcelsària en vinya (Vitis vinifera) a Raimat*. M. Ribes (tut.) y J. Arnó (tut.). Projecte Final de Carrera. ETSEA. Universitat de Lleida, p. 121.

- **Bramley, R. y Proffitt, T.** 1999. *Managing variability in viticultural production*. The Australian Grapegrower & Winemaker, **427**, 11-16.

- **Bramley, R.G.V., Proffitt, A.P.B., Corner, R.J. y Evans, T.D.** 2000. *Variation in grape yield and soil depth in two contrasting Australian vineyards*. In: Soil 2000: New Horizons for a New Century. Australian and New Zealand Second Joint Soils Conference. Volume 2, edited by J.A. Adams y A.K. Metherell, New Zealand Society of Soil Science, Lincoln, New Zealand, p. 29-30.

- **Bramley, R.G.V. y Williams, S.K.** 2001. *A protocol for winegrape yield maps*. In: ECPA 2001. Proceedings of the 3rd European Conference on Precision Agriculture, edited by G. Grenier and S. Blackmore, (agro-Montpellier, Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier, France), p. 773-778.

- **Bramley, R.G.V.** 2001a. *Progress in the development of Precision Viticulture – Variation in Yield, Quality and Soil Properties in Contrasting Australian Vineyards*. In: Precision tools for improving land management, edited by L.D. Currie y P. Loganathan, Occasional report No. 14. Fertilizer and Lime Research Centre, Massey University, Palmerston North, New Zealand. www.crcv.com.au/research/programs/one/bramley1, p. 25-43.

- **Bramley, R., Pearse, B. y Chamberlain, P.** 2003. *Being profitable precisely – a case study of precision viticulture from Margaret River*. The Australian & New Zealand Grapegrower & Winemaker, **473a**, 84-87.

- **Bramley, R.G.V. y Lamb, D.W.** 2003. *Making sense of vineyard variability in Australia*. In: Precision Viticulture. Proceedings of the IX Congreso Latinoamericano de Viticultura y Enología, edited by R. Ortega and A. Esser, (Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile), p. 35-54.

- **Bramley, R.G.V. y Hamilton, R.P.** 2004. *Understanding variability in winegrape production systems. 1. Within vineyard variation in yield over several vintages*. Australian Journal of Grape and Wine Research, **10**, 32-45.

- **Ehlert, D., Adamek, R. y Horn, H-J.** 2007. *Assessment of laser rangefinder principles for measuring crop biomass*. In: Precision Agriculture'07. Proceedings of the 6th European Conference on Precision Agriculture, edited by J.V. Stafford, (Wageningen Academic Publishers, Wageningen, The Netherlands), p. 317-324.

- **Escolà, A., Rosell, J. R., Massana, P., Planas, S., Gil, E., Val, L., Camp, F., Gracia, F., Solanelles, F., Llorens, J. y Vallès, J. M.** 2005. *Tree canopy volume measurement with ultrasonic sensors in fruit orchards, vineyards and citrus groves*. Barcelona, Book of Abstracts, 8th Workshop on Spray application techniques in fruit growing, (Gil, Solanelles, Escobar, Planas, Rosell y Val, ed.), p. 89-90.

- **Escolà, A., Camp, F., Solanelles, F., Llorens, J., Planas, S., Rosell, J.R., Gracia, F.J. y Gil, E.** 2007. *Variable dose rate sprayer prototype for tree crops based on sensor measured canopy characteristics*. In: Precision Agriculture'07. Proceedings of the 6th European Conference on Precision Agriculture, edited by J.V. Stafford, (Wageningen Academic Publishers, Wageningen, The Netherlands), p. 563-571.

- **Gil, E., Escolà, A., Rosell, J.R., Planas, S. y Val, L.** 2007. *Variable rate application of plant protection products in vineyard using ultrasonic sensors*. Crop Protection, **26** (8), 1287-1297.

- **Giles, D.K., Delwiche, M.J. y Dodd, R.B.** 1988. *Electronic measurement of tree canopy volume*. Transactions of the ASAE, **31**(1), 264-272.

- **Goutouly, J.P., Drissi, R., Forget, D. y Gaudillère, J.P.** 2006. *Characterization of vine vigour by ground based NDVI measurements*. VIth International Terroir Congress, Bordeaux, p. 237-241.

- **Hidalgo, J.** 2006. *La calidad del vino desde el viñedo*. Madrid, Ediciones Mundi-Prensa, p. 389.

- **Johnson, L.F., Roczen, D.E., Youkhana, S.K., Nemani, R.R. y Bosch, D.F.** 2003. *Mapping vineyard leaf area with multispectral satellite imagery*. Computers and Electronics in Agriculture, **38**, 33-44.

- **Lee, K.-H. y Ehsani, R.** 2007. *Comparison of two 2D laser scanners for sensing object distances, shapes and surface patterns*. Computers and Electronics in Agriculture, article in press, doi:10.1016/j.compag.2007.08.007.

- **Llorens, J.** 2005. *Posada a punt d'un sistema d'adquisició de dades basat en un sensor làser LMS 200 per a la caracterització geomètrica de cultius arboris*. R. Sanz y J.R. Rosell (tut.). Projecte Final de Carrera. ETSEA. Universitat de Lleida, p. 217.

- **Llorens, J., Rosell, J.R., Sanz, R., Escolà, A. y Palacín, J.** 2007. *Determinació de paràmetres vegetatius amb un sistema lidar terrestre, a partir de la generació de models tridimensionals d'arbres fruiters*. In: V Congrés Institució Catalana d'Estudis Agraris. Comunicació nº 8 de l'àrea III.

- **Palacín, J., Pallejà, T., Tresánchez, M., Sanz, R., Llorens, J., Ribes-Dasi, M., Masip, J., Arnó, J., Escolà, A. y Rosell, J.R.** 2007. *Real-time tree-foliage surface estimation using a ground laser scanner*. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, **56** (4), 1377-1383.

- **Pérez, M., y Agüera, J.** 2005. *Monitores de rendimiento para cosechadoras de algodón y tomate*. Vida Rural, **202**, 60-63.

- **Plant, R.E.** 2001. *Site-specific management: the application of information technology to crop production*. Computers and Electronics in Agriculture, **30**, 9-29.

- **Sanz, R., Llorens, J., Arnó, J., Vallès, J.M., Escolà, A., Massana, P., Camp, F., Gil, E., Palacín, J., Masip, J., Ribes-Dasi, M., Solanelles, F. y Rosell, J.R.** 2005a. *Idoneidad y manejo de los datos de un escáner láser (LIDAR) para la caracterización de determinados parámetros vegetativos de interés en frutales y viña*. León, III Congreso Nacional de Agroingeniería, Comunicación Nº 136

- Sanz, R., Palacín, J., Sisó, J.M., Ribes-Dasi, M., Masip, J., Arnó, J., Llorens, J., Vallès, J.M. y Rosell, J.R. 2004. *Advances in the measurement of structural characteristics of plants with a LIDAR scanner*. Leuven (Belgium), Book of Abstracts of the AgEng 2004 Conference, 400-401, Paper NR 277.

- Sanz, R., Llorens, J., Ribes-Dasi, M., Masip, J., Arnó, J., Vallès, J. M., Escolà, A., Massana, P., Camp, F., Palacín, J., Solanelles, F., Gil, E., Planas, S., Val, L. y Rosell, J. R. 2005b. *First results of a non-destructive LIDAR system for the characterization of tree crops as a support for the optimization of pesticide treatments*. Barcelona, Book of Abstracts, 8th Workshop on Spray application techniques in fruit growing, (Gil, Solanelles, Escobar, Planas, Rosell y Val, ed.), p. 85-87.

- Schumann, A.W. y Zaman, Q.U. 2005. *Software development for real-time ultrasonic mapping of tree canopy size*. Computers and Electronics in Agriculture, **47**, 25-40.

- Solanelles, F., Escolà, A., Planas, S., Rosell, J.R., Camp, F. y Gracia, F. 2006. *An electronic control system for pesticide application proportional to the canopy width of tree crops*. Biosystems Engineering, **95** (4), 473-481.

- Sudduth, K.A. 1999. *Engineering technologies for precision farming*. USDA-Agricultural Research Service. Columbia, Missouri, USA. International Seminar on Agricultural Mechanization Technology for Precision Farming, Suwon, Korea, 27 May 1999, p. 16.

- Tisseyre, B., Mazzoni, C., Ardoin, N. y Clipet, C. 2001. *Yield and harvest quality measurement in precision viticulture – Application for a selective vintage*. In: Proceedings of the 3rd European Conference on Precision Agriculture, edited by G. Grenier and S. Blackmore, (agro-Montpellier, Montpellier, France), p. 133-138.

- Tumbo, S.D., Salyani, M., Whitney, J.D., Wheaton, T.A. y Miller, W.M. 2002. *Investigation of laser and ultrasonic ranging sensors for measurements of citrus canopy volume*. Applied Engineering in Agriculture, **18** (3), 367-372.

- **Walklate, P.J., Richardson, G.M., Baker, D.E., Richards, P.A. y Cross, J.V.** 1997. *Short-range LIDAR measurement of top fruit tree canopies for pesticide applications research in the UK*. Proceedings of SPIE Vol. 3059, p. 143-149.

- **Walklate, P.J., Cross, J.V., Richardson, G.M., Murray, R.A. y Baker, D.E.** 2002. *Comparison of different spray volume deposition models using LIDAR measurements of apple orchards*. Biosystems Engineering, **82** (3), 253-267.

- **Walklate, P.J., Cross, J.V., Richardson, G.M., Baker, D.E. y Murray, R.A.** 2003. *A generic method of pesticide dose expression: Application to broadcast spraying of apple trees*, Annals of Applied Biology, **143**, 11-23.

- **Walklate, P. J. y Cross, J. V.** 2005. *Optimised dose adjustment of broadcast air-assisted sprayers: Generalised theory and simplifications behind the advice to UK apple grower*. Barcelona, Book of Abstracts, 8th Workshop on Spray application techniques in fruit growing, (Gil, Solanelles, Escobar, Planas, Rosell y Val, ed.), p. 149-152.

- **Walklate, P.J., Cross, J.V., Richardson, G.M. y Baker, D. E.** 2006. *Optimising the adjustment of label-recommended dose rate for orchard spraying*. Crop Protection, **25**, 1080-1086.

- **Wei, J. y Salyani, M.** 2004. *Development of a laser scanner for measuring tree canopy characteristics: Phase 1. Prototype development*. Transactions of the ASAE, **47** (6), 2101-2107.

- **Wei, J. y Salyani, M.** 2005. *Development of a laser scanner for measuring tree canopy characteristics: Phase 2. Foliage density measurement*. Transactions of the ASAE, **48** (4), 1595-1601.

- **Zaman, Q.U. y Schumann, A.W.** 2005. *Performance of an ultrasonic tree volume measurement system in commercial citrus groves*. Precision Agriculture, **6**, 467-480.

- **Zhang, N., Wang, M. y Wang, N.** 2002. *Precision agriculture – a worldwide overview*. Computers and Electronics in Agriculture, **36**, 113-132.